TURBODYNAMOS
VERWANDTE MASCHINEN

EINLEITUNG.

Die Schwierigkeiten, die sich beim Entwurf und Bau von Turbodynamos ergeben, sind durch die einer gegebenen Leistung entsprechenden hohen Umlaufzahlen bedingt, wie sie die direkte Kupplung mit den bis jetzt üblichen Dampfturbinen mit sich bringt. Diese Umlaufzahlen sind in meiner Broschüre „Die Dampfturbinen" unter „Praktische Daten" ausführlich zusammengestellt; dort finden sich auch noch andere für den Konstrukteur von Turbodynamos wichtige Gesichtspunkte betr. Dampfturbinen aufgeführt, namentlich in konstruktiver Hinsicht (Lager etc.) hängt jenes kleine Werk eng mit dem vorliegenden zusammen.*)

Die hohen Umlaufzahlen von Turbodynamos führen zu Umfangsgeschwindigkeiten des rotierenden Teiles von 60 bis

*) Zum Studium der elektrischen Grundlagen für den Entwurf von Turbodynamos verweise ich auf meine zwei grösseren Werke „Elektrische Maschinen und Apparate", sowie „Elektrische Maschinen und Anlagen", wo die für Turbodynamos wichtigen Probleme bereits im Zusammenhang erörtert sind. Über Turbodynamos habe ich Aufsätze veröffentlicht in „Z. V. D. I.", 1905, S. 762 ff.; „Zeitschr. f. d. g. Turbinenwesen", 1905, Heft 1—3; „Z. f. E.", 1904, 7. und 14. Februar und 1905, S. 1. sowie S. 495; „Electrical World", 1904, 19. und 26. Mai und 15. Oktober. Weitere Turbodynamos finden sich im Handbuch der Elektrotechnik Bd. IV (2. Aufl.)

150 m/Sek., während man bei üblichen Dynamos kaum je 30 bis 40 m/Sek. überschritten hat. Bei den verhältnismässig kleinen Durchmessern dieser hochtourigen Maschinen von etwa 0,3 bis kaum 2 m kommt man pro 1 kg Eigengewicht auf Fliehkräfte von 1000 bis 10,000 kg. Da bekanntlich der Rotor in der Regel Wicklungen trägt mit den gebrechlichsten unserer Konstruktionsmaterialien, d. h. mit Isolation aus Papier, Leinen, Glimmer etc., die sich alle leicht verschieben und verbiegen, bezw. wie man sagt, die während des Betriebes leicht „arbeiten", so leuchtet von vorneherein ein, dass betriebssichere Turbodynamos nur von vorzüglich eingerichteten Werkstätten zu erwarten sind, die über zuverlässige und erfahrene Arbeiter verfügen und wo bestes Material verwendet wird. Neben der sorgfältigen mechanischen Durchkonstruktion der raschlaufenden Rotoren und Lager, entsprechend den grossen Fliehkräften, hat der Konstrukteur von Turbogeneratoren durch geeignete Hilfsvorrichtungen für eine energische Kühlung und durch entsprechende Formgebung des Rotors für geräuschlosen Gang zu sorgen; bei Gleichstrom-Turbodynamos bereitet weiterhin die funkenfreie Kommutierung ganz erhebliche Schwierigkeiten.

Leicht ist es bei allen raschlaufenden Dynamos, guten Wirkungsgrad, kleinen Spannungsabfall sowie bei Drehstrom einwandfreien Parallelbetrieb selbst bei Belastung durch Synchronmotoren und Einankerumformern zu erzielen. Ohne weiters lässt sich auch das Gewicht pro KW, die Grundfläche pro KW (besonders bei vertikaler Anordnung) und der Preis pro KW niedrig halten, obwohl namentlich der Preis keineswegs auch nur annähernd umgekehrt proportional mit der Tourenzahl sinkt, da bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten einmal die Materialien sorgfältig ausgewählt werden müssen und anderseits die Herstellung grosse Präzision, also hohe Löhne bedingt.

Zweifelsohne ist für Turbodynamos die gleiche dauernde Betriebssicherheit viel schwerer zu erreichen als bei den mit gewöhnlichen Pendeldampfmaschinen gekuppelten Typen. Jede Reduktion der Tourenzahl der Dampfturbinen bis auf etwa die Hälfte der jetzt üblichen ist im Interesse des elektrischen Teiles jedenfalls zu begrüssen. Der Preisunterschied gegenüber den jetzigen übermässig hohen Tourenzahlen dürfte nur ein geringer sein, da die Materialien weniger schwierig zu beschaffen und die Löhne geringer wären. Trotzdem mag erwähnt werden, dass durchaus erprobte Typen von Turbodynamos bereits auf dem Markte sind, die bezüglich Betriebssicherheit nichts zu wünschen übrig lassen.

Dieselben Gesichtspunkte wie für Dampfturbinen-Dynamos gelten auch für Turbo-Dynamos in direkter Kupplung mit Wasserturbinen für hohes Gefälle von 50 bis 1000 m, ferner für hochtourige Umformer mit hohem Schwungmoment und schliesslich für Elektromotoren zum Antrieb von Zentrifugalpumpen für grosse Druckhöhen von 50 bis 500 m.

DREHSTROMDYNAMOS.

MECHANISCHER AUFBAU DER DREHSTROM-TURBOGENERATOREN.

Theoretisch genommen können Turboalternatoren ebenso wie gewöhnliche Drehstromdynamos in folgender Weise aufgebaut werden:

als *Gleichpoltype* mit durchwegs ruhenden Wicklungen;
als *Wechselpoltype* und zwar diese wieder
  als *Aussenpol*maschine, die wiederum
    mit *rotierendem Anker* oder
    mit *rotierendem Feld* ausgeführt werden kann;
als *Innenpol*maschine, bei der man unterscheidet
    ausgeprägte Pole und
    walzenförmige Feldkörper mit verteilter Feldwicklung.

Ausser den Synchrongeneratoren kann man auch *Asynchronmaschinen* verwenden, die an sich bei hohen Umlaufzahlen und geringer Polzahl günstiger ausfallen als bei niedriger Tourenzahl. In ihrer einfachsten Form erregen sie sich durch wattlose Ströme vom Netz, dem sie von Synchrongeneratoren- und -motoren oder von Umformern geliefert werden. Durch An-

bringung eines Kommutators kann die Asynchronmaschine selbsterregend gemacht werden.

Tatsächlich sind alle obigen Formen, abgesehen von den Asynchrongeneratoren, als hochtourige Turbodynamos gebaut worden und zwar noch im Laufe der letzten fünf Jahre, trotzdem sind aber alle bis auf die Innenpoltype sozusagen „historisch" geworden, was mich indessen nicht hindert, im Interesse der jungen Ingenieure hier einzeln auf dieselben einzugehen.

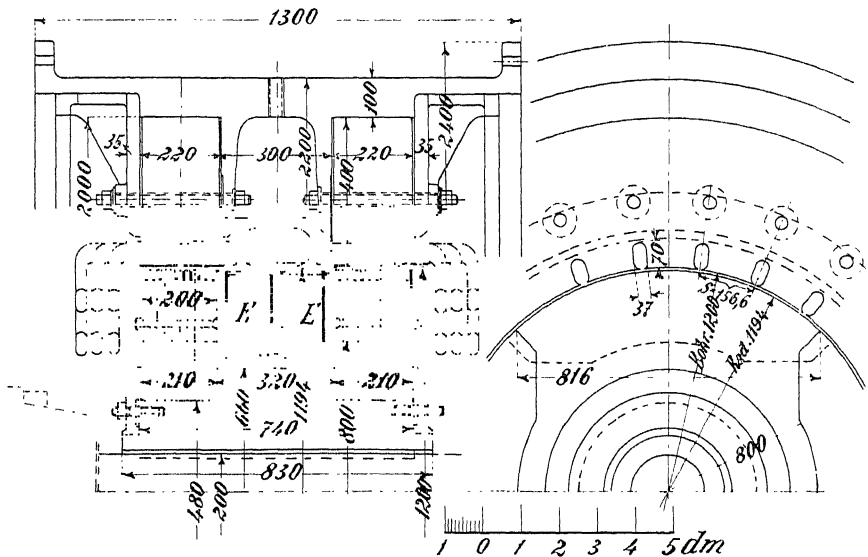



Fig. 1. Maschinenfabrik Oerlikon, 1200 KVA, 1500 Touren, AW (total) = 30000.

Charakteristisch für alle Drehstrom-Turbodynamos ist, dass sie wenige grosse Pole (etwa 2—12) und deshalb schwere Feldspulen pro Pol besitzen.

Bei der *Gleichpol-* oder *Induktor*type rotiert ein einfaches Stahlrad ohne jegliche Wicklung; auf dem Rad sitzen nebeneinander zwei Kränze von Polansätzen. Die Zahl der Ansätze jedes Kranzes entspricht der Polpaarzahl; um im Stator eine einzige durchgehende Wicklung zu erhalten, werden die zwei Kränze um 1/2p des Umfangs gegen einander versetzt.

Die Fig. 1 zeigt eine vierpolige (2×2) Induktortype der Maschinenfabrik Oerlikon für 1200 KVA, 1500 Touren, 50 Perioden, 2000 Volt, 2×24 Nuten, $\eta = 0{,}92$, Flux K $18 \cdot 10^6$. Das rotierende Rad besteht aus 2×10 Schmiedeisenplatten von 20 mm Stärke, an denen die Polansätze sitzen. In Fig. 2

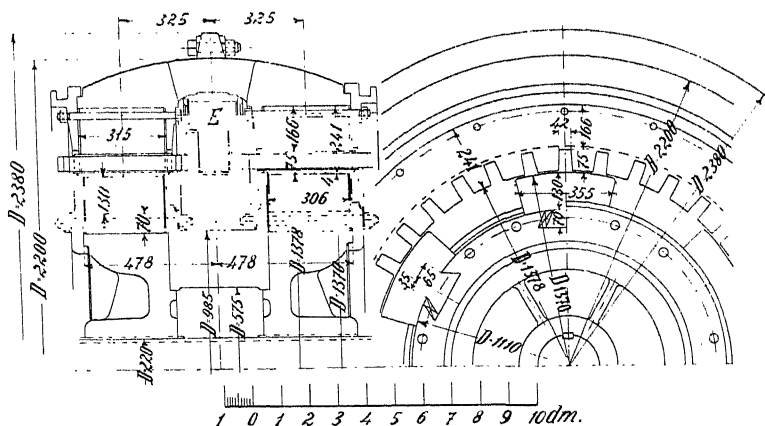



Fig. 2. Maschinenfabrik Oerlikon. 650 KVA (einphasig). 500 Touren.

(Oerlikon) sind die lamellierten Polansätze durch Schwalbenschwänze und Keile befestigt: 650 KVA einphasig, 500 Touren, 50 Perioden, 4000 Volt, 2×6 Pole, 2×36 Nuten, wovon 2×12 leer.

Die Firma Sautter, Harlé & Cie., Paris, gibt der Induktortype nur einen Polkranz (Fig. 3), dafür aber zwei ruhende Erregerspulen E_1 und E_2, die zur Kühlung noch unterteilt sind; die Maschine hat überdies drei Luftspalte L_1, L'_2 und L''_2; die zwei letzteren liegen allerdings sehr nahe an der Drehachse, so dass sie klein gehalten werden können.

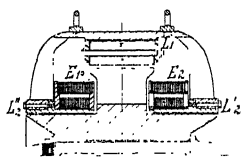



Fig. 3.

Da jeder Polkranz einer *zwei*poligen Induktortype nur *einen* Polansatz bekommt, so ist das Ausbalancieren einer derartigen raschlaufenden Maschine so gut wie ausgeschlossen. Die Maschinenfabrik Oerlikon hat nun für diesen Fall die Kon-

struktion Fig. 4 ausgebildet: Der eine Polansatz wird in zwei gleiche Hälften P_1 zerlegt, dazwischen liegt um 180 Grade versetzt der zweite Polansatz P_2. Die Polansätze sind auf der Gegenseite durch Messingklötze Q_1 Q_2 ausgeglichen. Der Stator weist ebenfalls drei Eisenkörper E_1, E_2, und E_3 und zwei Erregerspulen M_1, M_2 auf. Die über die Lager gebauten Erregerspulen m_1, m_2 sind umgekehrt erregt wie die benachbarten Haupterregerspulen, um den durch die Welle, die Lager und das Gehäuse gehenden Streuflux aufzuheben (D. R. P. 144054 und 153163).

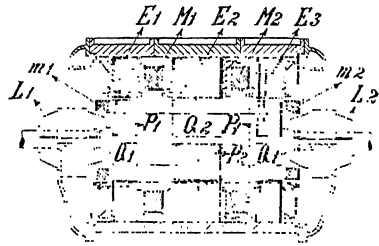



Fig. 4.

Die Gleichpoltype hat wohl den Vorteil, dass ihre Umfangsgeschwindigkeit etwas höher sein kann als bei den andern Typen; sie fällt jedoch schwerer und teurer aus. Namentlich die Streuung ist grösser, die Spannungskurve ist häufig unsymetrisch und enthält unerwünschte höhere harmonische Glieder; die Streufelder geben auch häufig bei hohen Tourenzahlen zu unzulässiger Erwärmung durch Eisen- und Wirbelstromverluste Veranlassung.

Die *Aussenpoltype* mit *rotierendem Anker* gestattet, die rotierende Wicklung in einzelnen Spulen gleichmässig über den Umgang zu verteilen, und diese können in geschlossenen Nuten oder in offenen Nuten mit Keilabschluss zuverlässig festgehalten werden. Deckt man die als Fasswicklung ausgeführten Stirnverbindungen durch einen geschlossenen Metallzylinder oder eine Reihe Bandagen ab, so erhält man einen ziemlich glatten geräuschlos arbeitenden Rotor. Parsons hat die Aussenpolmaschine nach Fig. 5 und 6 öfters ausgeführt*): 350 Amp. 1000 Volt, 3000 Touren, einphasig.

*) Nach S. Thompson: Die dynamoelektrische Maschine.

Die Maschinenfabrik Oerlikon hat die in Fig. 7 und 8 dargestellten Aussenpolmaschinen entworfen: Fig. 7 leistet bei 3000 Touren 200 KW 190 Volt Drehstrom, 50 Perioden; es

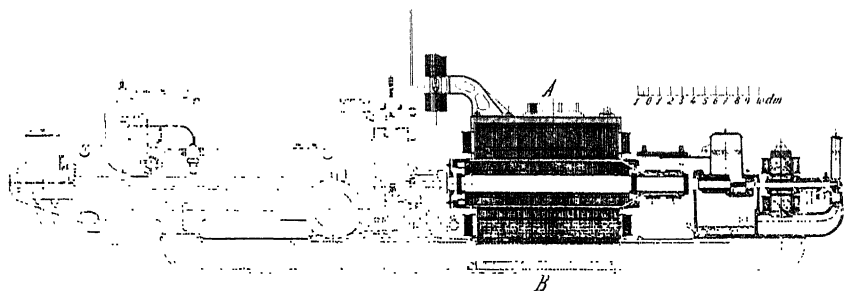



Fig. 5. Masse siehe Tabelle I.

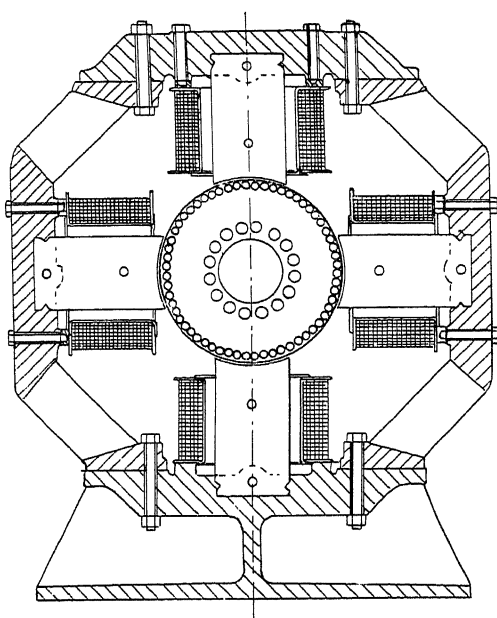



Fig. 6. Schnitt AB aus Fig. 5.

sind 72 Nuten vorgesehen, wovon 24 leer bleiben, in 48 Nuten liegt je 1 Stab 8 × 35 mm; die Spulen der einzelnen Phasen liegen nebeneinander, sie greifen nicht ineinander über, deshalb ist der Spannungsfaktor*) c nicht 2,1, sondern etwa 1,6. Fig. 8 leistet 400 KW zweiphasig, 42 Perioden und 2520 Touren; sie hat 108 Nuten, 4 × 7 Nuten bleiben ungestanzt, 4 × 2 sind leer, in 72 Nuten ist ein Stab 5 × 42 mm. In Fig. 9 sind die Spulen einer Einphasenmaschine durch Klammern an Bolzen befestigt. Die Versuchsmaschine Fig. 10 der A. E. G.

*) $E = c \cdot n\, Z\, K \cdot 10^{-8}$. E = E. m. K. n = Periodenzahl. Z = Leiterzahl pro Phase. K = Flux pro Pol.

Berlin ist ebenfalls eine Aussenpolmaschine, sie leistet bei 3000 Touren und niedriger Spannung 300 KVA. In jeder der geschlossenen Rotornuten (Fig. 11), ist je ein Kupferstab ein-

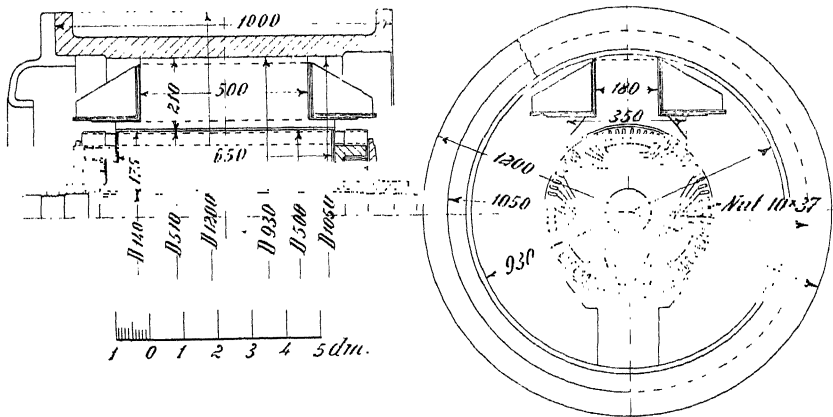



Fig. 7. Maschinenfabrik Oerlikon, 200 KW 3000 Touren.
$K = 9 \cdot 10^6$, AW pro Pol = 15000. Gewicht = 5,5 t.

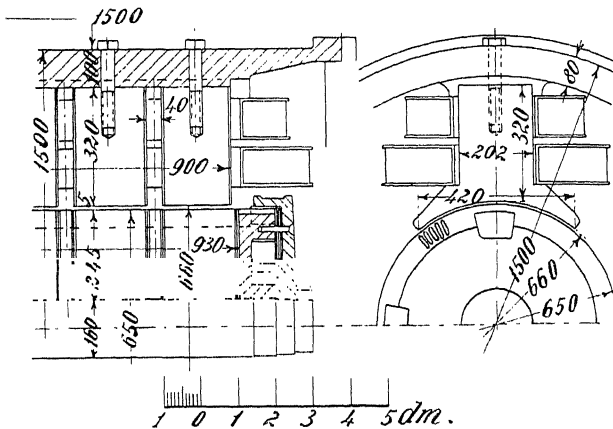



Fig. 8. Maschinenfabrik Oerlikon, 400 KW 2520 Touren.
$K = 16 \cdot 10^6$, 390 Volt.

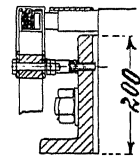



Fig. 9.

gebettet; die Stirnverbindungen bestehen aus hochkant gestellten Kupferringen, in denen Löcher zur Aufnahme der Kupferstäbe ausgespart sind (Fig. 12 und 13). Die mit zahlreichen Luftkanälen durchsetzte vierpolige Aussenpolmaschine Fig. 13a der Maschinenfabrik Oerlikon leistet bei 1500 Touren 1200 KVA,

5500 Volt und 50 Per.-Sek. Die Seitenverbindungen sind um Ansätze an den Flanschen gewickelt und werden durch Metallhauben gehalten; $K = 22{,}7 \cdot 10^6$, 48 Nuten 25×58 mm, Luftspalt = 5 mm, Wellendurchmesser = 220 mm, Stromdichte = 1,7 Amp./qmm.

Fig. 10. A. E. G. Berlin. 300 KVA 3000 Touren. Hiezu gehören die Details Fig. 11—13.

Für Hochspannung wird es bei hohen Umlaufzahlen sehr schwierig, die Wicklung der Aussenpoltype auf die Dauer betriebsicher zu isolieren, auch die Stromabführung durch die

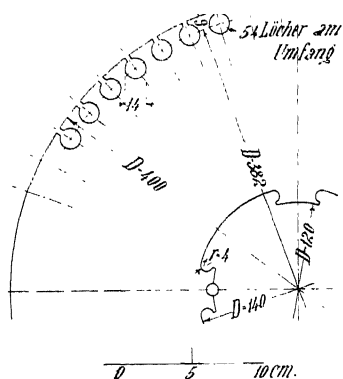



Fig. 11.

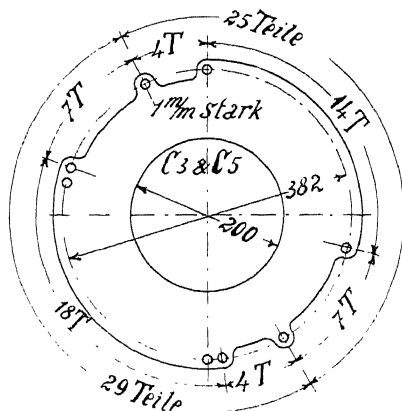



Fig. 12.

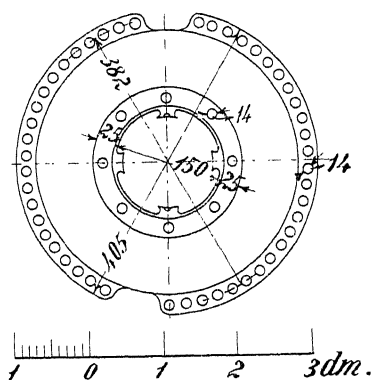



Fig. 13.

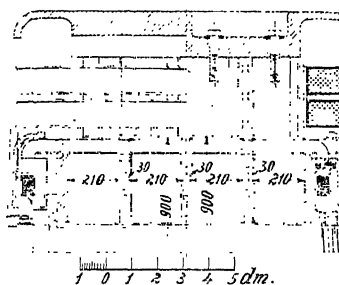



Fig. 13 a. Maschinenfabrik Oerlikon. 1200 KVA, 1500 Touren.

dreï Schleifringe ist nicht gerade einfach, so dass diese Type durch die für Hoch- und Niederspannung gleich einfache Innenpoltype, bei der nur die niedervoltige Gleichstromerregerwicklung rotiert, verdrängt wurde.

Wie nahe übrigens die Tourenzahlen der Wasserturbinen denen der Dampfturbinen kommen, zeigt ein von der Cie. de

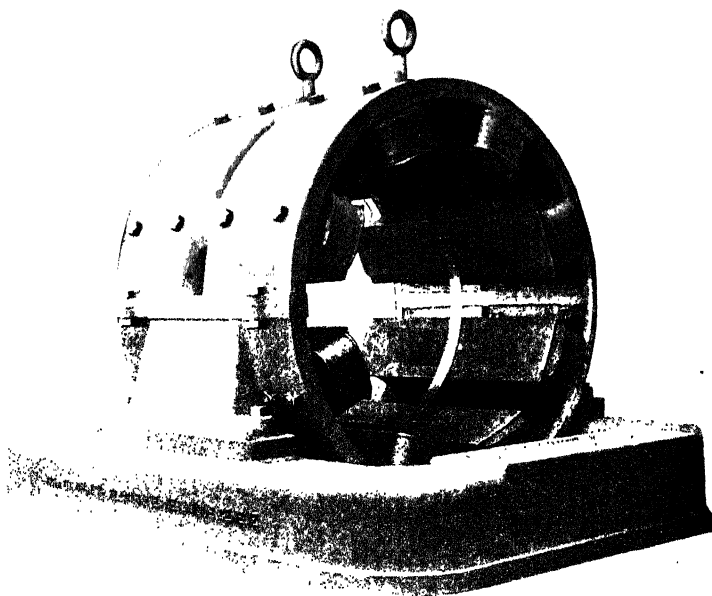



Fig. 14. Compagnie de l'Industrie Electrique Genf, 2000 KW 750 Touren.

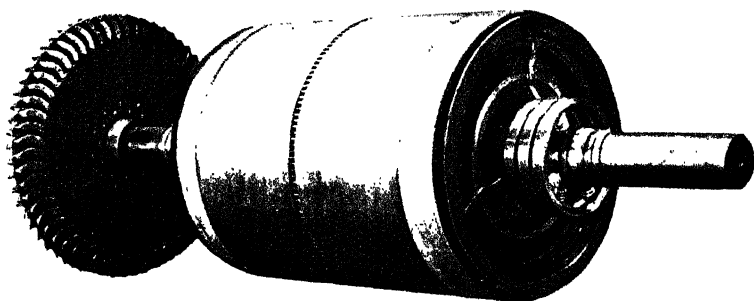



Fig. 15. Compagnie de l'Industrie Electrique Genf, 2000 KW 750 Touren.

l'Industrie Electrique Genf ausgeführter Generator für 2000 KW, 750 Touren und 6000 Volt Drehstrom, Fig. 14 und 15; die Tourenzahl ist dieselbe wie die der Curtisturbine. Der betr.

Drehstromgenerator hat feststehendes Aussenfeld. Der Anker mit der rotierenden Hochspannungswicklung hat einen Durchmesser von 1,5 m, eine Eisenlänge von 1,5 m, d. h. eine Umfangsgeschwindigkeit von 55 m/Sek., beim Durchgehen über 100. Die Grössenkonstante C $\frac{KVA}{d^2 l u}$ ist etwa 0,8. Der Anker hat nur einen 50 mm breiten Ventilationskanal, dem beiderseits Flügel Luft zuführen; um ein Pfeifen zu vermeiden, ist über die Pole gegenüber dem Luftschlitz ein Blechring genietet. Auch das Polgehäuse hat in der Mitte einen Luftschlitz. Die Schleifringe sitzen auf radial gestellten Isolatoren. Die Lager haben einen spezifischen Druck von $p = 9{,}5$ kg und eine Umfangsgeschwindigkeit von $w_z = 10{,}2$ m, d. h. $pw_z = \backsim 100$; es ist Wasserkühlung vorgesehen. Die Wicklung liegt in ganz geschlossenen Nuten, 2 Stäbe $16 \times 7{,}2$ mm pro Nut. Das Gesamtgewicht des Generators ist 43 t.

Die *Aussenpoltype mit rotirendem Feld* ist eigentlich nur für recht langsamlaufende Maschinen mit hohem Schwungmoment, z. B. für Gasdynamos berechtigt. Als einziges hierher gehöriges Beispiel sind die ersten zweiphasigen Niagara-Turbodynamos für 3750 KVA, 2500 Volt und 250 Touren mit stehender Welle anzuführen.

Fig. 16. 3750 KVA, 25 Perioden.

Die Type ist zuerst von der Westinghouse Co.*) entwickelt worden. Der zweite Satz Aussenpolmaschinen für die Niagara-Anlage ist von der General

*) Siehe Niethammer Hdb. der Elektrot. Bd. IV, Fig. 608—611 (1. Aufl.).

Electric Co. nach Fig. 16*) für die gleiche Leistung und Tourenzahl wie die ersten geliefert worden. Diese Type hat wohl den Vorteil, dass die Polbefestigungsmittel nicht beansprucht werden, da die Fliehkraft die Pole einfach gegen den geschlossenen Jochring aus Nickelstahl presst. Das Ausbalancieren**) der rotierenden Glocke ist indessen ziemlich schwierig, auch im übrigen ist der konstruktive Aufbau weniger einfach als der der Innenpoltype, die für alle neueren Niagaramaschinen von 3750 und 7500 KW benützt worden ist. Bezüglich des Aufbaues der Erregerwicklung muss auf die Innenpoltype hingewiesen werden.

Der Rotor der *Innenpoltype* kann aus dünnen Blechen von 1—3 mm oder aus Stücken von 50—100 mm Dicke oder ganz massiv aus einem Stück oder aus einer Nabe mit aufgesetzten Polen aufgebaut werden.

Die Innenpoltype mit *ausgeprägten Polen* lässt sich für äussere Umfangsgeschwindigkeiten bis gegen 70 m pro Sekunde anstandslos verwenden. Bei mässigen Umfangsgeschwindigkeiten kann der Feldkörper aus Stahlguss bestehen, bei höheren Geschwindigkeiten aber aus gepresstem Schmiedestahl oder Gusstahl, bezw. 1—3 mm starken gestanzten Schmiedeisenblechen. Die einzelnen Teile eines zusammengesetzten Feldkörpers können auch aus verschiedenartigem Material sein, z. B. Joch und Nabe aus Stahlguss, Pol und Polschuhe aus dünnen Blechen.

Für den Aufbau des Feldkörpers mit ausgeprägten Polen gibt es drei Möglichkeiten:

1. Joch, Pole und Polschuhe *ein* Stück;
2. Joch und Pole *ein* Stück, Polschuhe aufgesetzt;
3. Pole und Polschuhe *ein* Stück, auf dem separaten Joch befestigt.

*) Z. V. D. I. 1904.

**) Siehe im Kapitel „Ausbalancieren“ am Schluss dieses Werkes.

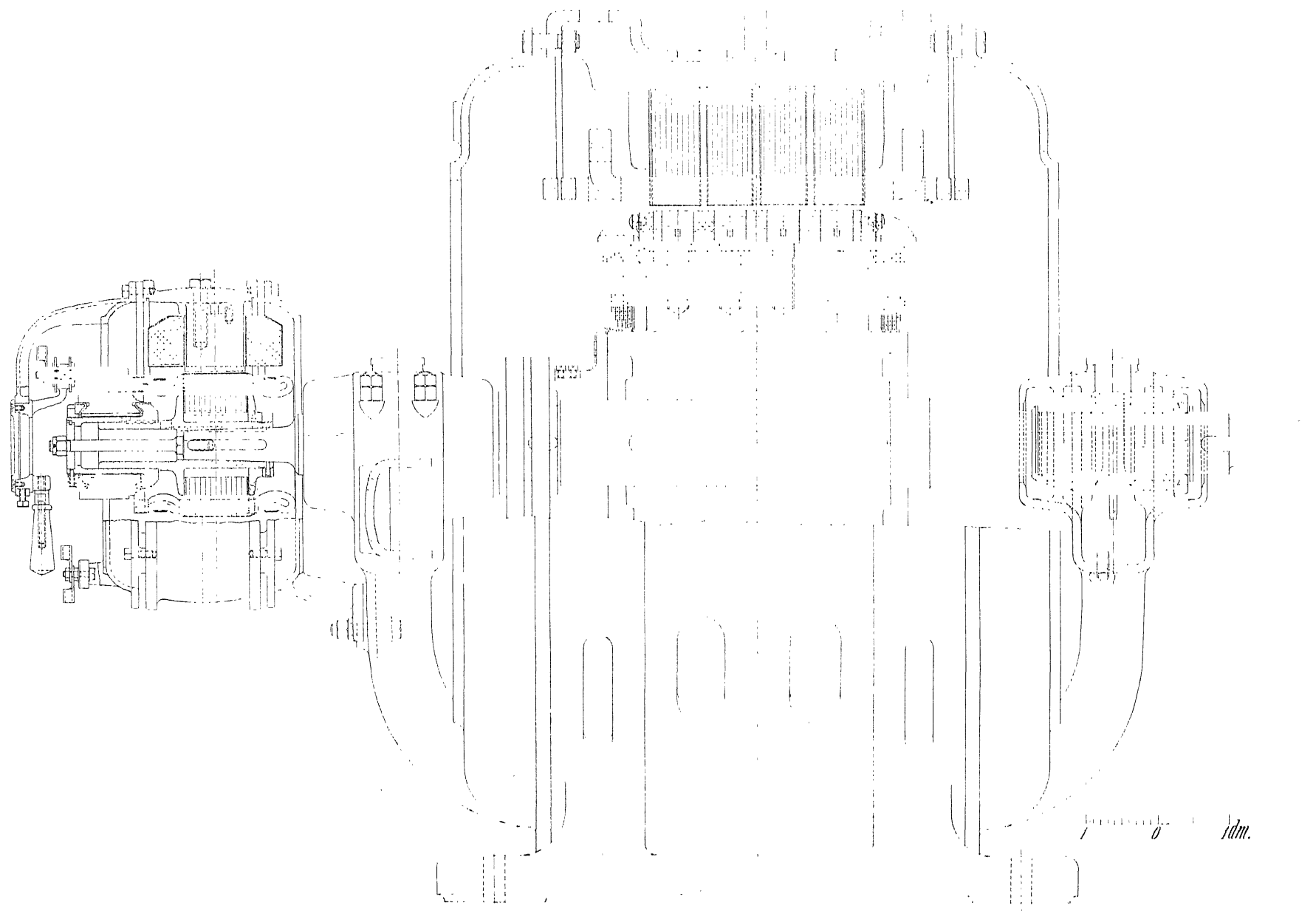



Fig. 18. A.-G. J. J. Rieter & Co., Winterthur. 170 KVA, 1000 Touren.
Hiezu gehört Fig. 19.

Im ersten Fall muss man die Feldwicklung ganz direkt auf den Feldkörper wickeln, Fig. 17, was für hohe Geschwindigkeiten kaum betriebssicher ausgeführt werden kann.

Im zweiten Fall werden die Polschuhe entweder mit den Polen verschraubt, Fig. 18—21, oder sie werden mit Hilfe

Fig. 17.

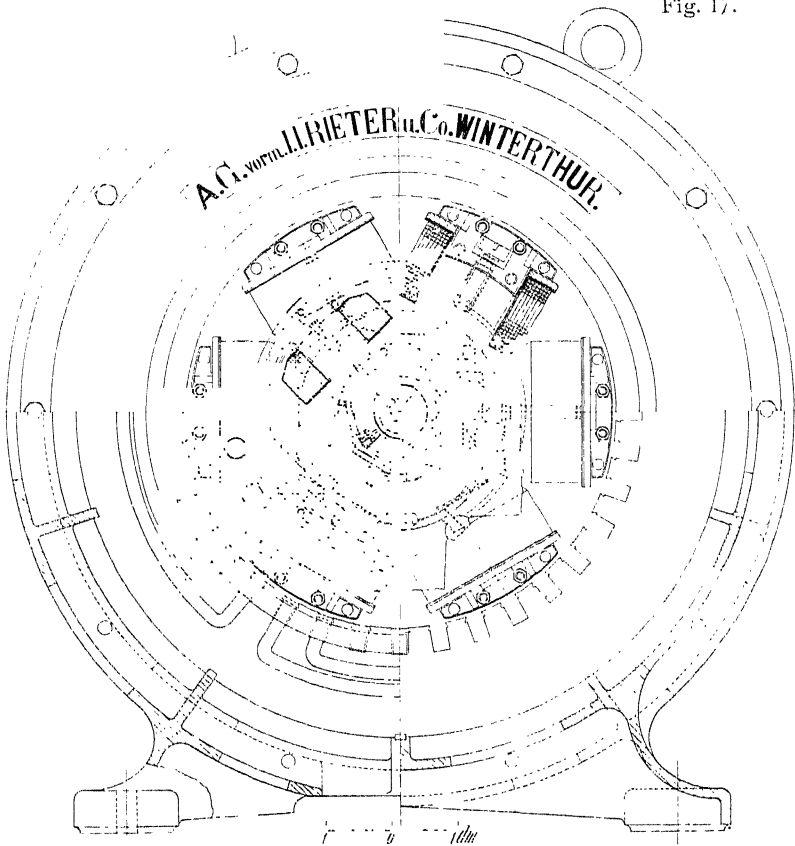



Fig. 19. Querschnitt von Fig. 18.

von Schwalbenschwänzen, Fig. 22, eingesetzt oder sie werden nach Fig. 23—26b*) (General Electric Co.) verzapft. Fig. 18

*) Fig. 25 a—b sowie 26 a—b aus E. P. 22912 (1903).

und 19 der A. G. J. J. Rieter & Co. leistet 170 KVA bei 1000 Touren, 4000 Volt, 50 Perioden; Bohrung = 660 mm, Nutzahl = 36, 36 Drähte 3,4 mm Φ pro Nut. Die Polschuhe sind geblättert, die Polschuhschrauben stark versenkt, um Wirbelströme zu vermeiden.*) Fig. 20 von Ganz & Co. leistet 1300 KVA

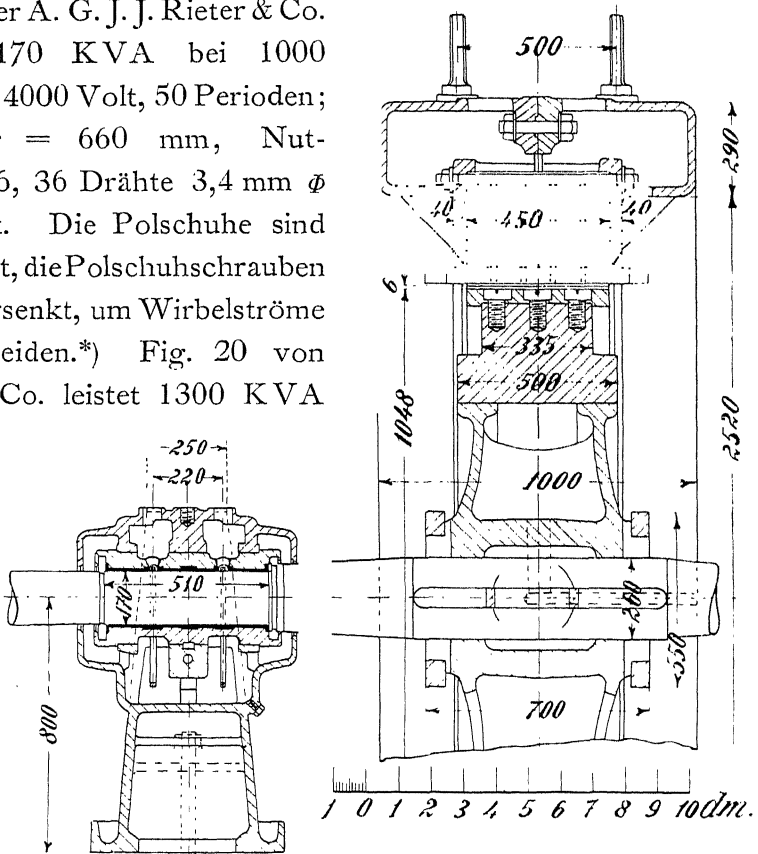



Fig. 20. 1300 KVA 420 Touren.

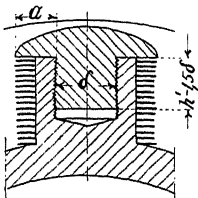
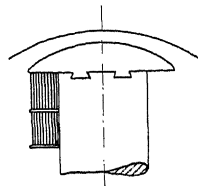
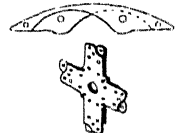



Fig. 21 (h' = 1,5 δ) Fig. 22. Fig. 23.

bei 420 Touren, auf den Armstern ist ein Stahlkranz mit den Polansätzen aufgezogen. Die Maschinenfabrik Oerlikon legt in

*) Man beachte die Luftschlitze an den Gehäusehauben des Erregers (Fig. 18).

Fig. 27 und 28 einen Ring über die Pole, der aus verzapften und vernieteten Metallsegmenten von Eisen und Messing besteht. Auch die *Pole* werden mit Hilfe von Schrauben,

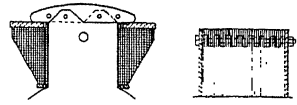



Fig. 24.

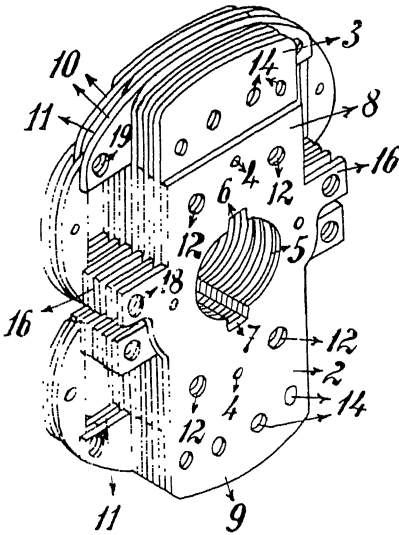



Fig. 25 a.

Fig. 26 a.

25a—26b stellen denselben Rotor dar.

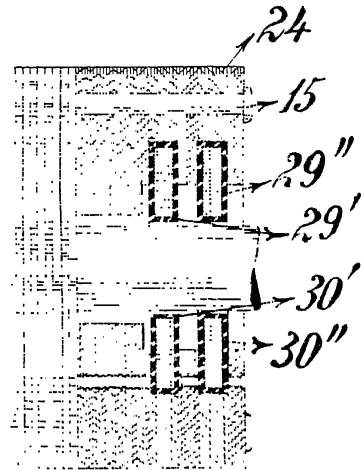
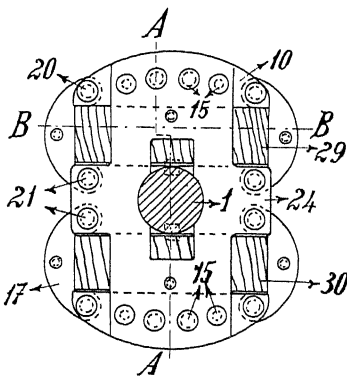



Fig. 25 b.

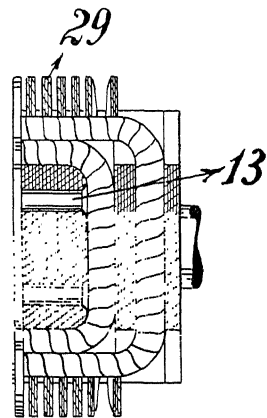



Fig. 26 b.

Fig. 29 — 32a, oder von Schwalbenschwänzen mit Keilen, Fig. 33 bis 34b, oder mit Hilfe einer anderen Verkeilung,

Fig. 35—37, am Jochring befestigt. Für Schrauben ist allerdings in den wenigsten Fällen bei hohen Geschwindigkeiten genügender Platz vorhanden; am ehesten sind Stiftschrauben, die durch den ganzen Pol bis zum Joch gehen, möglich, Fig. 38. Fig. 29 der Maschinenfabrik Oerlikon leistet bei 214 Touren 3250 KVA (14 Pole, 25 Perioden, 10000 Volt); Fig. 30 derselben Firma 3000 KVA 300 Touren, 45 Perioden, 5000 Volt, 18 Pole; Fig. 30a 6500 KVA, 300 Touren, 25 Perioden 10000 Volt, 10 Pole;

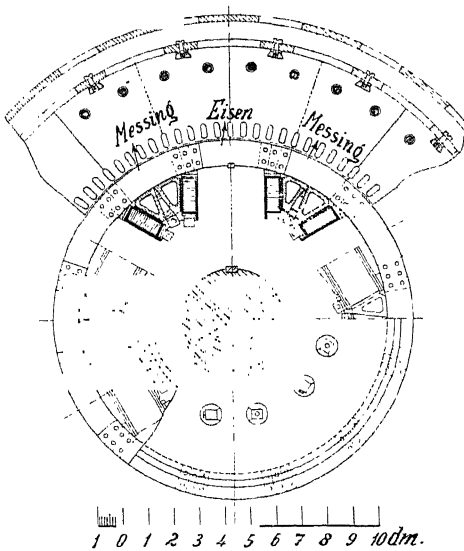



Fig. 27. Maschinenfabrik Oerlikon. 2400 KVA, 1000 Touren, 50 Per.

Fig. 31 der General Electric Co. (Niagara) 7500 KVA, 250 Touren, 11000 Volt, 25 Perioden; Fig. 32 von Ganz & Co. 3500 KVA, 210 Touren, 42 Perioden, 10000 Volt; Fig. 35 und 36 der Maschinenfabrik Oerlikon leistet 2400 KW bei 1000 Touren; Fig. 37 der General Electric Co. 5000 KW, 500 Touren. In Fig. 39—41 sind Pol- und Joch-Blechpackete abwechselnd miteinander verzapft. Damit mehrere Schwalbenschwänze gleichmässig die Fliehkräfte aufnehmen, sieht die General Electric Co.

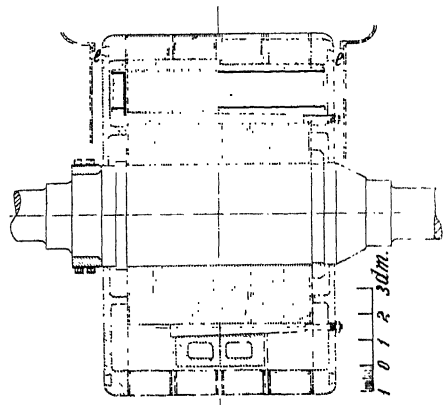



Fig. 28. Rotor zu Fig. 27

nach Fig. 34 (E. P. 6500 vom Jahr 1903) im Pol zur Federung einen radialen Schlitz 13 vor. Die Maschinenfabrik Oerlikon presst nach Fig. 42 die Bleche, die aus je einem Pol und einem Jochsegment bestehen, zwischen zwei Stahlgussflansche. Fig. 42*) leistet 425 KVA, 3600 Volt, bei 450 Touren, 50 Perioden und 12 Polen. Die Feldbleche,

Fig. 29. Maschinenfabrik Oerlikon. 3250 KVA. 214 Touren.

Fig. 30. Maschinenfabrik Oerlikon. 3000·KVA. 300 Touren.

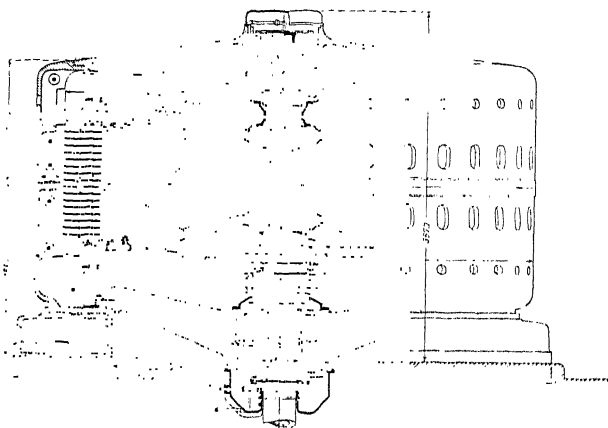
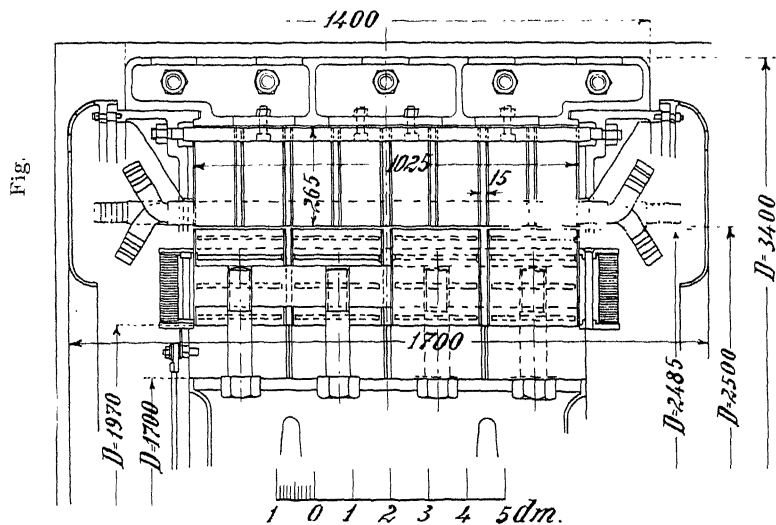
Fig. 43—45 der General Electric Co. umfassen je zwei Pole und das zugehörige Jochstück B, die Bleche werden versetzt aufgebaut und mit Hilfe von Schwalbenschwänzen vom Armstern gefasst; die Polschuhe sind in die Pole eingesetzt. (E. P. 22909 vom Jahr 1903).

Für die Erregerwicklung hochtouriger Maschinen mit ausgeprägten Polen kommt vor allem Hochkantkupfer von 30×1 bis 60×4 und 20×4 mm in Frage. Die Oberfläche des

*) Die Fig. 42, 34a und 32a finden sich ausführlicher behandelt in Z. V. D. I. 1905, S. 763 ff.

Kupfers muss absolut glatt und gratfrei sein, die Isolation aus Rotpapier zwischen den einzelnen Windungen nehme man ge-

Fig. 30a. Maschinenfabrik Oerlikon. 6500 KVA, 300 Touren.

Fig. 31. 7500 KVA, 250 Touren.

nügend stark, mindestens 0,5 mm oder mehr. Vor dem Aufsetzen presse man die Hochkantspulen hydraulisch zu einem festen Packet zusammen; in Fig. 30 und 30a, sowie 42 werden

die Hochkantspulen durch kräftige Bolzen zusammengepresst. Da ein möglichst grosser Querschnitt des Erregerkupfers wünschenswert ist, so hält man in der Regel die Erregerspannung niedrig, häufig nur 20—50 Volt; aus verschiedenen Gründen ist es jedoch wünschenswert, als Erregerspannung 65 oder 110—120 Volt zu verwenden. Um die Pressung innerhalb der Erregerspulen zu vermindern und die Fliehkraft stufenweise auf den Pol zu übertragen, kann man sie in einzelne Spulenkästen nach Fig. 46 von Siemens & Halske oder durch unmagnetische Zwischenstücke nach Fig. 47 und 48 von Lahmeyer-Frankfurt unterteilen. Dadurch wird ein Ausbauchen der Spulen auch bei verhältnismässig dünnem Leiterquerschnitt vermieden. In Fig. 37, 43—45 und 48a werden die Erregerspulen durch Klammern und Presskeile an dem Feldkörper festgehalten, letztere nehmen die tangentiell wirkende Komponente der Fliehkraft auf, die bestrebt ist, die Spulen auszubauchen. Die Firma Siemens & Halske presst die Hochkantspulen nach Fig. 49 durch Federn solid zusammen, um damit ein Arbeiten der Spulen auszuschliessen. Die Pressung pro qcm durch die Fliehkraft erreicht bei den letzten Windungen 100 kg und mehr. In Fig. 25a bis 26a sind die Feldspulen allseitig mit Blechen umbaut; in Fig. 27 und 28, sowie 35 und 36 sind in der Achsrichtung einstellbare Keile,

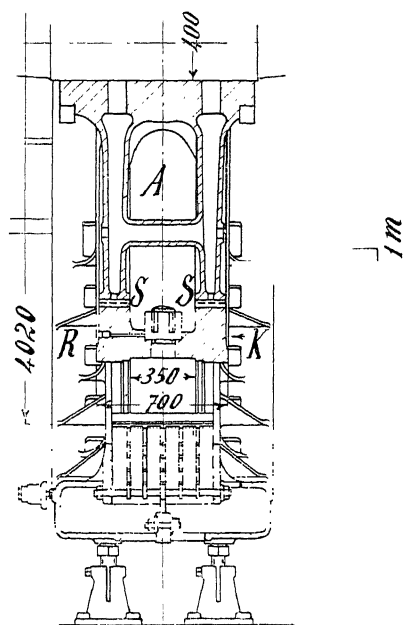



Fig. 32. 3500 KVA, 210 Touren.
A = Armstern aus Gusseisen
K = Stahlkranz, S = Keile, R = Flügel.

auf den Stirnseiten Stahlkappen vorgesehen; die Taschen e in Fig. 28 dienen zum Ausbalancieren.*)

Die Feldspulen grosser niederperiodiger und hochtouriger Maschinen muss man wohl auch in zwei konzentrischen Teilen,

Fig. 32a. E. G. Alioth — Centrale Hauterive.
950 KVA, 8600 Volt, 300 Touren, 20 Pole. Ringspurzapfen mit Wasserkühlung.

Fig. 50 bis 50c, ausführen; die Spule Fig. 50 wird durch Bolzen zusammengepresst und hat Luftkanäle.

Flach liegendes Kupferband, Fig. 22, ist für hohe Tourenzahlen wegen des Ausbauchens nicht empfehlenswert.

Feldkörper mit ausgeprägten Polen sollten durch nichtmagnetische Scheiben und durch Bandagen seitlich vollständig

*) Die Bullock El. Mfg. Co. teilt nach dem E. P. 10172 (1904) jede Feldspule in 2 Hälften übereinander und legt eine I-förmige Platte dazwischen, deren Seitenflansche die Wicklung gegen Ausbauchen schützen.

abgedeckt werden, sodass sie wie ein allseitig glatter Zylinder wirken, wobei jedoch durch radiale und achsiale Kanäle für genügende Kühlung zu sorgen ist.

Fig. 33
Maschinenfabrik Oerlikon.

Auch bei ausgeprägten Polen kann man, wie das im nächsen Abschnitt erörtert wird, die Feldwicklung in eine Reihe Nuten unterteilen. Eine solche Anordnung wird z. B. von der Westinghouse Co. nach Fig. 38 ausgeführt. Ausser den eingefrästen Nuten zur Aufnahme der Wicklung sind noch eine grosse Zahl radial eingedrehter Luftkanäle

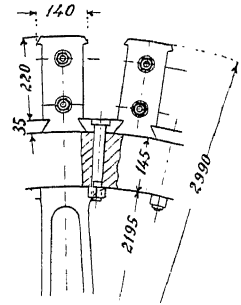
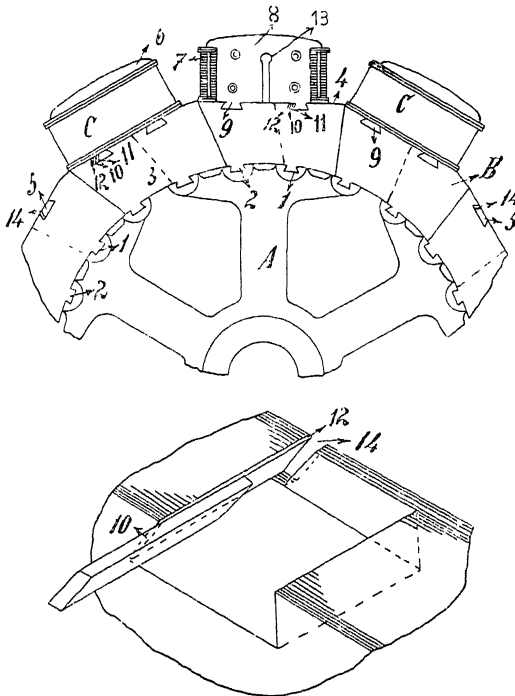



Fig. 34.

vorgesehen. Der ganze Feldkörper besteht aus massivem Flussstahl. Das Einwickeln des flachen Kupferbandes geschieht auf einem horizontalen Karussel-Drehwerk nach Fig. 51. Der in

Fig. 52 und 53 dargestellte Turboalternator der Westinghouse Co. leistet dreiphasig 3500 KW bei 1000 Touren, 11000 Volt und 33 $^1/_3$ Per. Der Stator hat 10 Nuten per Pol und Phase, d. h. insgesamt 120 nahezu geschlossene Nuten mit *einem* Stab per

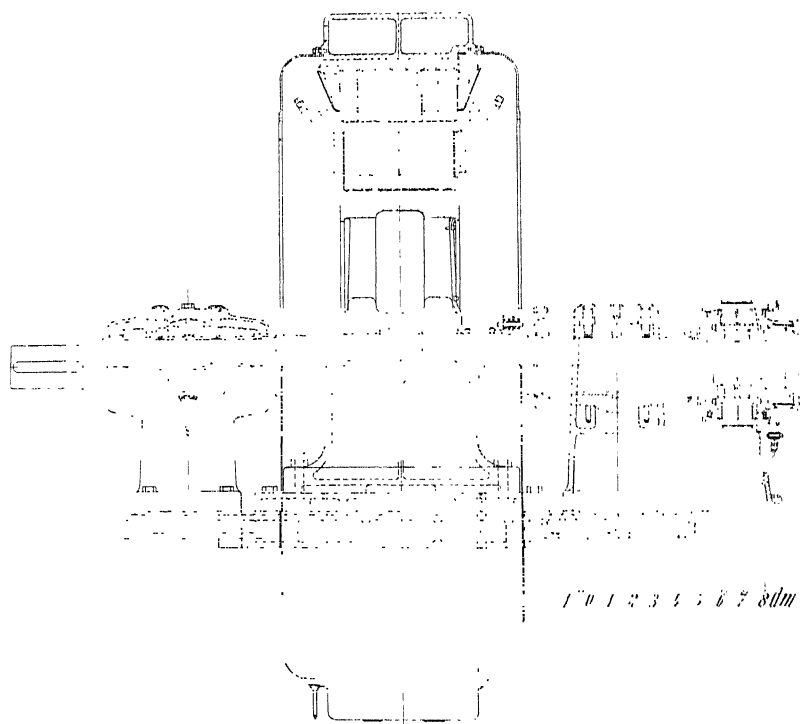



Fig 34a. Oesterr. Union E. G. (Sillwerke)
2500 KVA, 315 Touren, 42 Perioden, 11000 Volt.

Nut. Die Grössenkonstante ist nahezu 1·5. Der Vollastwirkungsgrad ist zu 96 $^1/_2$% garantiert.

Ein sechspoliger 1500 KW-Generator der Westinghouse Co. hat in jedem Pol 5 Nuten und jeder der massiven Pole wird mit der Nabe durch 2×6 kräftige Bolzen verschraubt, Fig. 38. Die Rotoren der 5500 KW-Generatoren der British Westinghouse Co. für 1000 Touren (8 Pole) bestehen aus

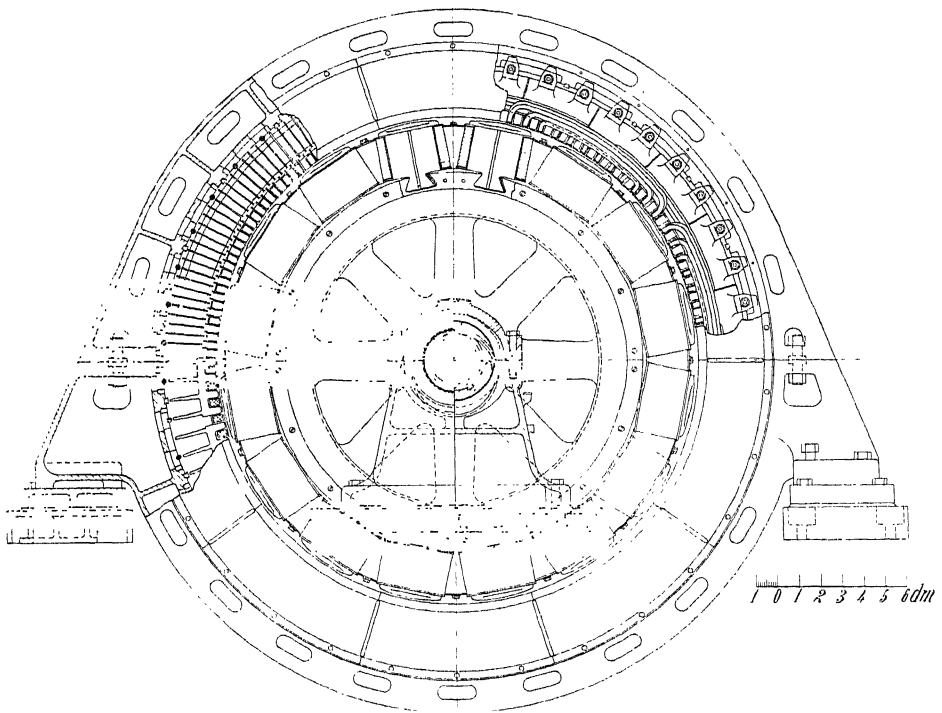



Fig. 34b. Schnitt und Ansicht von Fig. 34a.

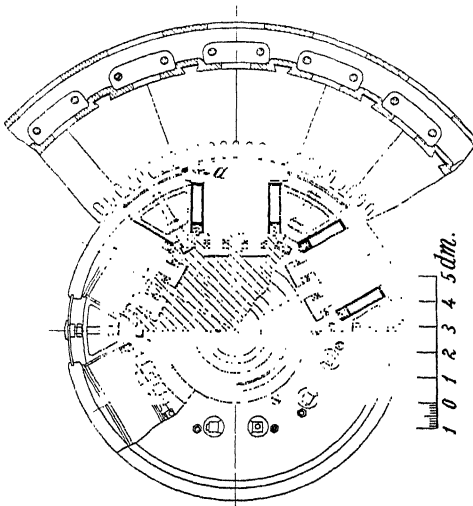



Fig. 35. Maschinenfabrik Oerlikon 2400 KVA, 1000 Touren, 50 Perioden.

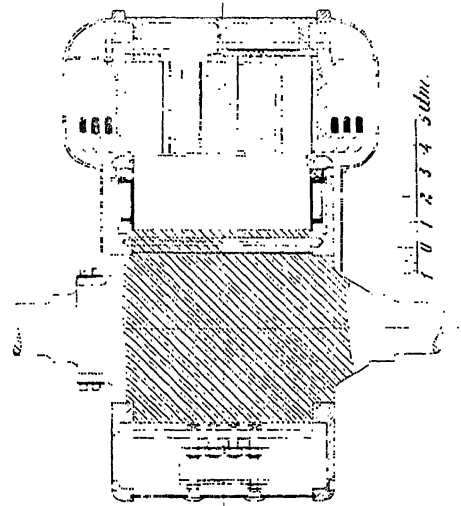



Fig. 36. Schnitt durch Fig. 35.

massivem gepresstem Whitworth-Schmiedestahl; das Schmiedestück wird zur Aufnahme der Welle, die durch den massiven Rotor ausserordentlich versteift wird, ausgebohrt.

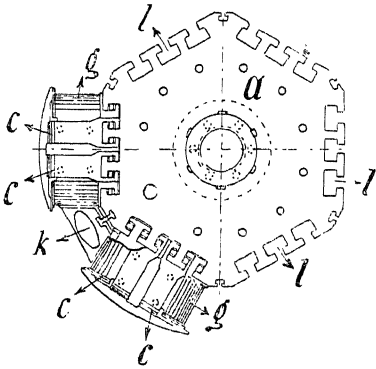



Fig. 37. 5000 KW, 500 Touren.

Die in Fig. 54 gezeichnete Befestigung der Erregerwicklung in Löchern von eingesetzten Stahl- oder Bronce-Segmenten H rührt von Parsons her. Die Stirnverbindungen werden durch geschlossene Metallkappen mit Luftkanälen abgedeckt.

Die Verwendung einer glatten Walze mit einer in Nuten *ver-*

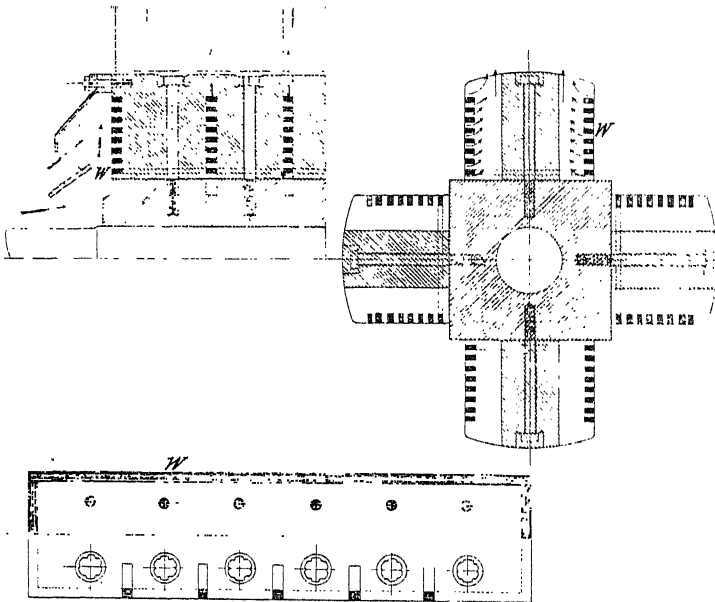



Fig. 38.

teilten Feldwicklung ist wohl die betriebsicherste Konstruktion eines Feldkörpers für Turbodynamos; damit erzielt man auch am ehesten geräuschlosen Gang und es sind Umfangsgeschwindig-

keiten von gegen 150 m pro Sekunde möglich. Die Firma Brown, Boveri & Cie. hat diese Konstruktion*) nach der Fig. 55 und 56 für zahlreiche Maschinen mit Leistungen bis 10000 PS

Details zu Fig. 39.

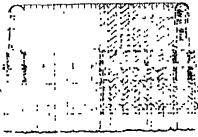



Fig. 39. Fig. 40. Fig. 41.

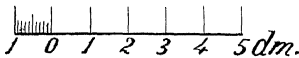
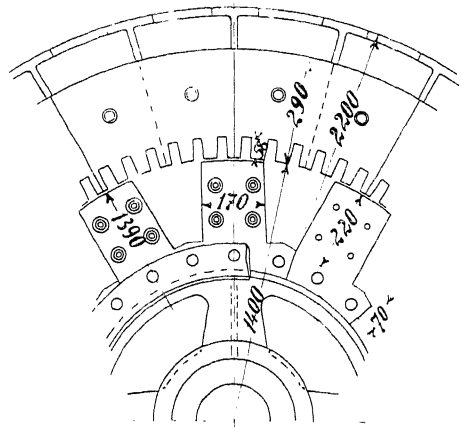
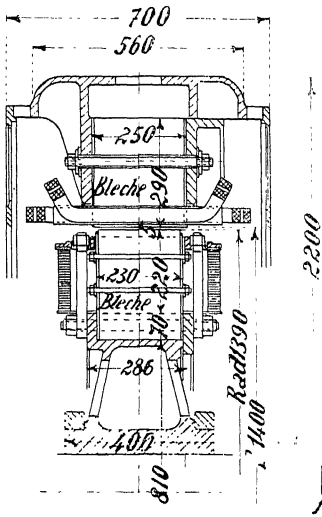



Fig. 42. Maschinenfabrik Oerlikon. 425 KVA, 450 Touren.

ausgeführt (D. R. P. 138,253). Der Drehstromalternator Fig. 56 leistet bei 3000 Touren 500 KVA, 2000 Volt, 50 Per. Die Nuten zur Aufnahme der Feldwicklung werden in der

*) In der Z. f. E. Wien 1905 S. 495, habe ich einen Drehstromgenerator von C. E. Brown für 1000 KW, 1500 Touren ausführlich besprochen, dort ist auch die von unten kommende Kühlung ersichtlich. Diese Type wird auch zur direkten Kupplung mit hochtourigen Wasserturbinen und Wasserpumpen verwendet (Olten-Aarburg, Elektr. Bahnen, 1905, S. 442).

Regel in den massiven Feldkörper eingefräst. Die Feldspulen bestehen aus umklöppeltem Flachkupfer, sie werden durch 6—10 mm starke Metallkeile in den Nuten festgehalten. Über die Stirnverbindungen, an denen in sorgfältiger Weise die Lötstellen von Spule zu Spule vorgesehen sind, kommt unter

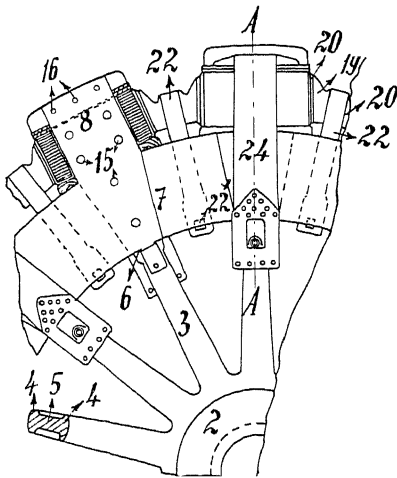



Fig. 43.

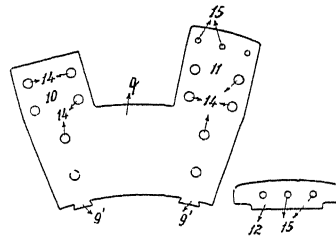



Fig. 44.

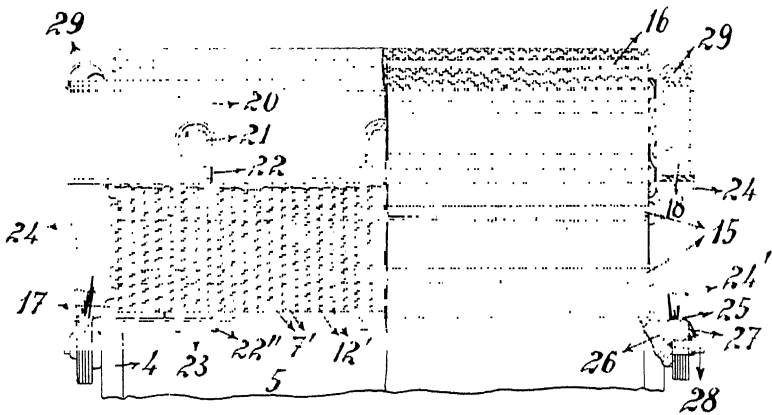



Fig. 45.

Zwischenlegung eines geeigneten Isolationszylinders eine Bronzekappe mit Ventilationsflügeln und Löchern zum Ausbalancieren. In manchen Fällen wird der Rotor nach Fig. 57 (D. R. P. 152389) aus Blechen aufgebaut; aus dieser Abbildung ist auch zu ersehen, dass die Lagerzapfen beiderseits in den Rotor-

körper eingesetzt sind. Den Herstellungsprozess des Rotors erkennt man am deutlichsten aus Fig. 58 und 59. Es ist üblich, die Rotornuten 20—40 mm breit und 60—90 mm tief zu machen; das flache Kupferband hat etwa die Abmessungen 1 × 10 bis 2 × 25 mm; bei grossen Typen legt man 2 Lagen nebeneinander; pro Pol verwendet man 2 × 3 bis 2 × 5 Rotor-

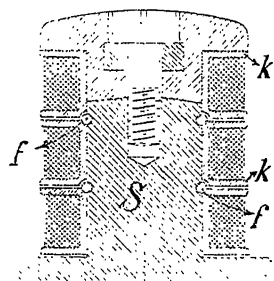



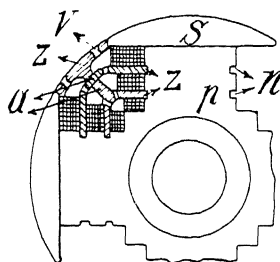
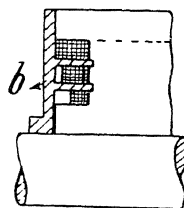
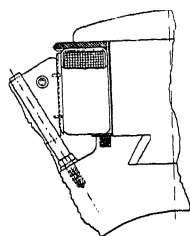
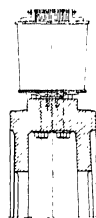
Fig. 46. Fig. 47. Fig. 48.

Siehe auch Fig. 27 und 35.

Fig. 48 a. Fig. 49.

nuten. Der Teil des Rotors, der keine Nuten trägt, entspricht 35—50 % des Umfangs. Die Isolation zwischen zwei Kupferbändern ist 0,3—0,6 mm Presspahn oder Umklöpplung, die Nutauskleidung ist 1,5—2,5 mm stark.

B. A. Behrend verwendet nach Fig. 60 und 61 die Brown'sche Konstruktion für die Turbogeneratoren der Bullock Mfg. Co. Nach ähnlichen Prinzipien bildet die Westinghouse Mfg. Co. ihre zweipoligen Feldkörper aus, Fig. 62—64.

Der Westinghouse-Turbogenerator auf der Ausstellung in St. Louis leistete 400 KW bei 3600 Touren, 400 Volt und 60 Per. Der Stator trägt 36 nahezu geschlossene Nuten mit einem massiven Stab per Nut, der von der Seite eingeschoben

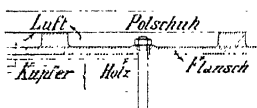
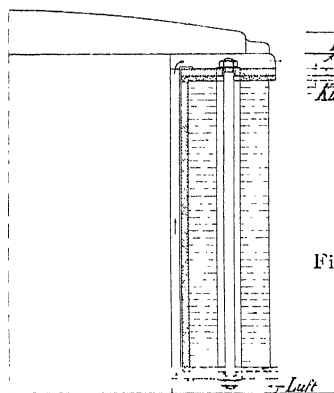



Fig. 50 a.

Fig. 50.

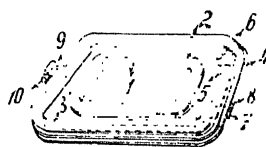



Fig. 50 c.

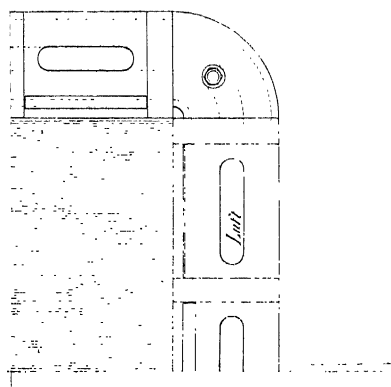



Fig. 50 b.

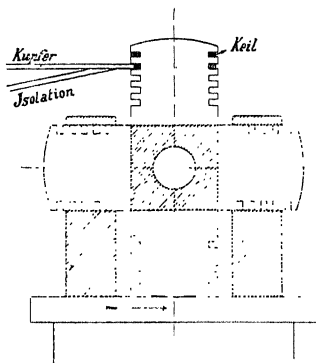



Fig. 51.

wird. Die Rotormasse gibt Fig. 64. Die Umfangsgeschwindigkeit ist etwa 110 m/Sek. und die Grössenkonstante $C = \frac{KVA}{d^2 l u} = \infty 0{\cdot}5$. Die Nuten des Rotors haben die Abmessungen 20×70 mm, und zwar sind es insgesamt 16 Nuten. Der Nutkeil aus Bronze ist 20 mm dick. Der Stator besitzt 11 Ventilationskanäle von 25 mm Breite, der Rotor drei.

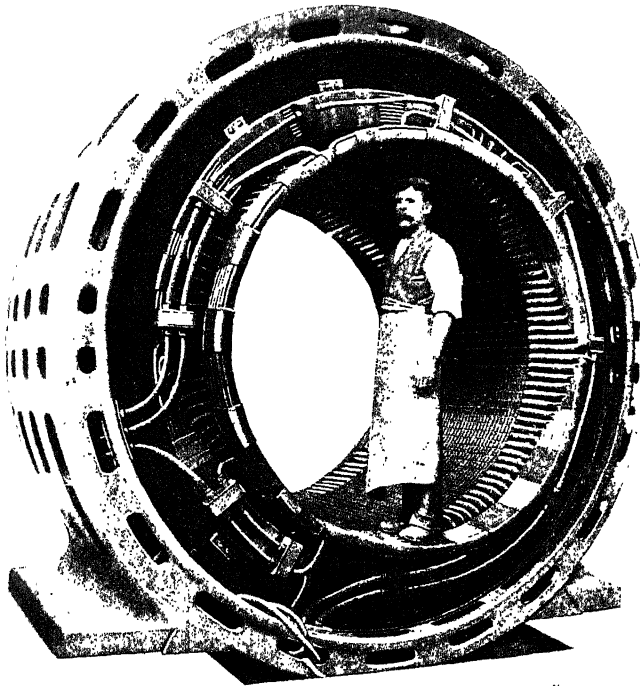



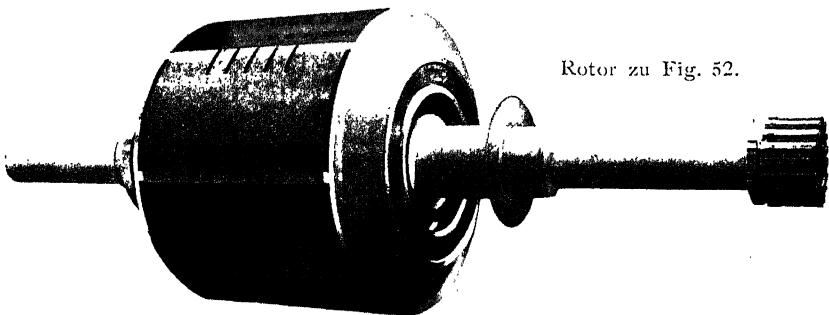
Fig. 52. Westinghouse Co., 3500 KW, 1000 Touren.

Rotor zu Fig. 52.

Fig. 53. Westinghouse Co., 3500 KW, 1000 Touren.

Der Luftspalt beträgt 25 mm. — Die A. E. G. Berlin versieht nach D. R. P. 146115 und 146116 die Rotorwalzen mit

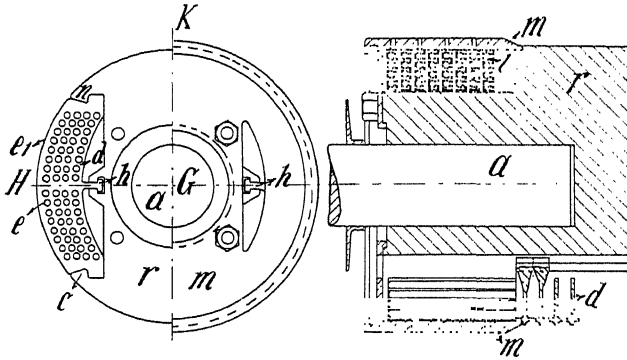



Fig. 54.

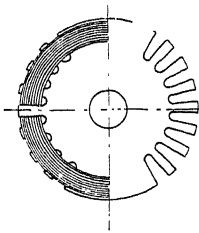



Fig. 55.

Schwalbenschwänzen, auf welche oben die formgewickelten Feldspulen gelegt werden (Fig. 65). Auf die Spulen werden dann durch einen Keilverschluss E die Zähne B gepresst. Diese Konstruktion scheint nicht so einfach und betriebssicher, wie eine in Nuten festgelegte Feldwicklung; sie hat je-

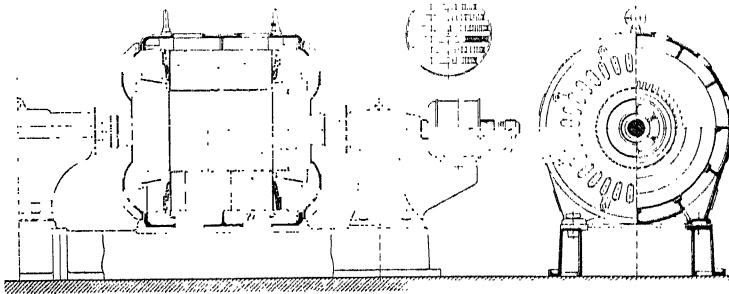



Fig. 56. Brown, Boveri & Co., 500 KVA, 3000 Touren.

doch den Vorteil, dass die Spulen vor dem Auflegen vollständig fertig gewickelt und umpresst werden können, überdies können die Zähne aus unmagnetischem Material bestehen, was aber

von geringer Bedeutung ist. Die einzelnen Spulen werden wie Hochkantfeldspulen durch Rotpapiereinlagen isoliert, hydraulisch zusammengepresst, mit Glimmer umpresst und bei 65—110 Volt Erregerspannung mit 3000 Volt Wechselstrom geprüft. Die Werkstätte der A. E. G. Berlin in der die Rotoren angefertigt

Fig. 57.

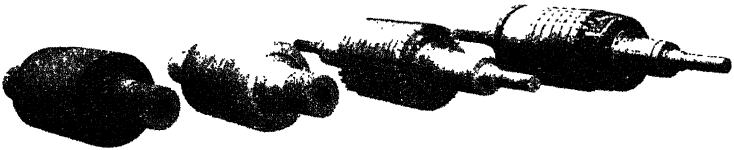



Fig. 58. Brown, Boveri & Co.

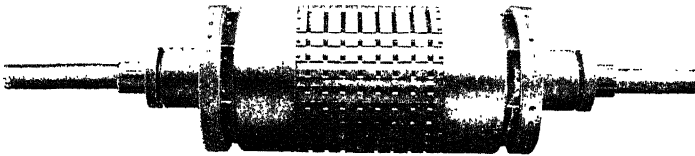



Fig. 59. Brown, Boveri & Co.

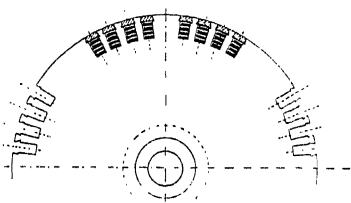



Fig. 60.

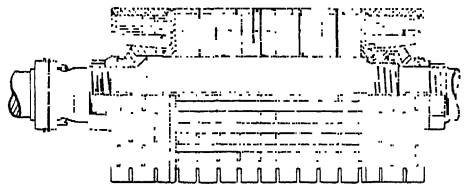



Fig. 61.

werden, zeigt Fig. 66; vorne ist der später erwähnte Prüfapparat zum Ausbalancieren sichtbar. Bei einer neueren Konstruktion der A. E. G. werden die Zähne des Rotors als Ganzes in Schwalbenschwänze des Rotors eingesetzt, zum Teil bestehen die Zähne aus nichtmagnetischer Bronze (D. R. P. 160391, Z. f. E., Wien 1905, S. 496, Schweiz. Patent 32488).

Die bis jetzt besprochenen verteilten Feldwicklungen bedecken nur etwa die Hälfte bis $^{2}/_{3}$ des Umfangs; man kann

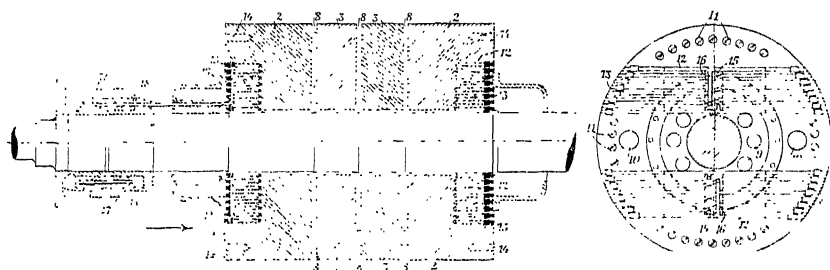



Fig. 62.

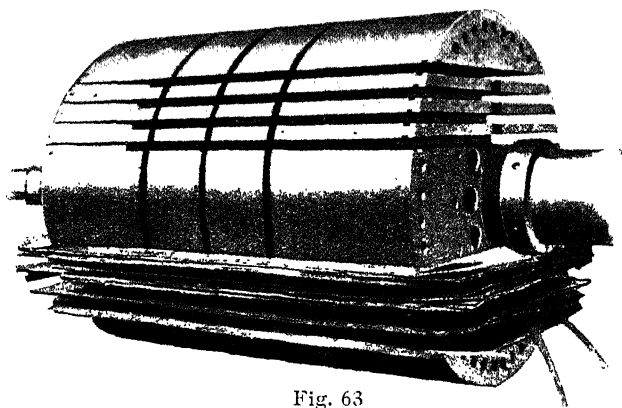



Fig. 63

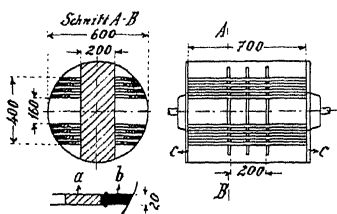



Fig. 64.

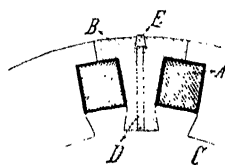



Fig. 65.

aber auch eine gleichmässig verteilte Gleichstromwicklung und zwar eine Trommel- oder eine Ringwicklung verwenden, obwohl dann die Ausnützung des Kupfers eine schlechtere ist.*)

*) Die resultierenden Feld-AW entsprechen dann nicht Strom mal Windungszahl, sondern etwa 60 % davon. Bei gleichem Kupferaufwand ist der Spannungsabfall der auf dem ganzen Umfang bewickelten Rotoren bedeutend grösser als derjenigen mit $P : \tau = \infty\ ^{2}/_{3}$.

Dafür dürfte aber das Ausbalancieren sich einfacher gestalten. Eine derartig gleichmässig verteilte Trommelwicklung für Feldkörper von Turbodynamos zeigen die Fig. 67 und 68*). Die Maschinenfabrik Oerlikon gibt in D. R. P. 157 306 die gleichmässig verteilte Feldwicklung Fig. 69 an, wobei die Stirnverbindungen durch konzentrisch zur Welle liegende von einander isolierte Kupferscheiben gebildet sind, welche geschlossene oder

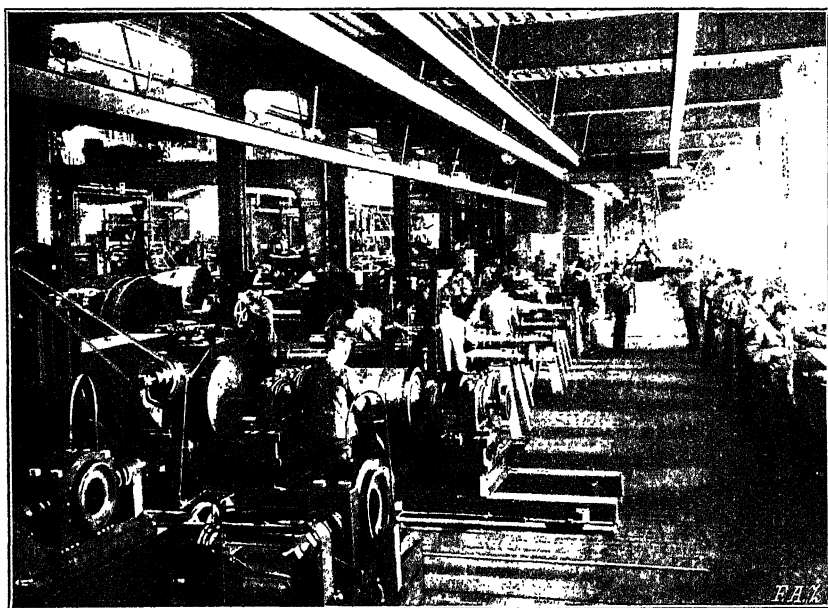



Fig. 66. Turbinenwerkstätte der A. E. G. Berlin.

schliessbare Aussparungen an ihrem Umfange besitzen, innerhalb derer die Leiter des Läufers isoliert bis zu der Scheibe durchlaufen, mit der sie leitend verbunden sind. Es sind dann keine Schutzkappen oder Bandagen erforderlich; die Scheiben können auch zur Ventilation ausgenützt werden. Dieselbe Konstruk-

*) Auch die Maschinenfabrik Oerlikon hat für Rüschlikon einen gleichmässig mit Nuten bedeckten lamellierten Rotor ausgeführt, die Nutteilung ist aber viel gröber als in Fig. 68; er leistet 400 KW, 5600 Volt, 42 Per., 2520 Touren, siehe Handbuch der Elektrotechnik Bd. IV, 2. Aufl. (Niethammer).

tion hat übrigens die A. E. G. für die Aussenpolmaschine Fig. 10 ebenfalls verwendet. Für diesen Fall können die Rotornuten ganz oder nahezu geschlossen sein, wobei die Stäbe von der Seite eingeschoben werden. Eine betriebssichere Feldkonstruktion erhält man auch, wenn man eine aus Hochkantstäben bestehende Ringwicklung nach Fig. 70 (1200 KVA, 1500 Touren, 50 Perioden der Maschinenfabrik Oerlikon) verwendet; diese Konstruktion führt aber zu einem unverhältnismässig hohen Kupferaufwand. — Für den ruhigen Gang ist die Verwendung homogenen Materials für den Rotor sehr wichtig (Kruppstahl). Lamellierte Pole baut man zweckmässig aus einzeln

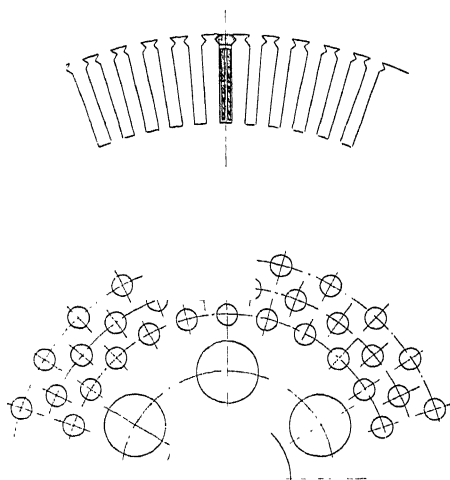



Fig. 67

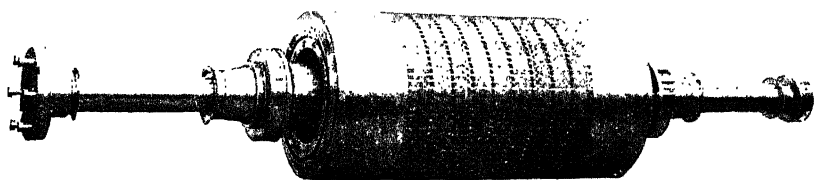



Fig. 68. Zweipoliger Rotor einer Turbodynamo der Siemens-Schuckertwerke für 550 KW, 750 Volt, 3000 Touren.

ausbalancierten Paketen von 25—50 mm Dicke auf, diese Pakete aus 10—30 Blechen von 1—3 mm Stärke werden durch Nieten von 10—15 mm Stärke zusammengepresst und aus ihnen wird vermittelst 20 :-30 mm starker Bolzen oder Nieten der ganze Pol aufgebaut.

Sehr ähnlich den Turbogeneratoren sind die Rotoren der hochtourigen *Drehstrommotoren* zur direkten Kupplung mit

Zentrifugalpumpen. Am solidesten lässt sich für diesen Fall ein Kurzschlussanker ausbilden, dessen Rotorstäbe in nahezu geschlossenen Nuten liegen und dessen Kurzschlussringe hoch-

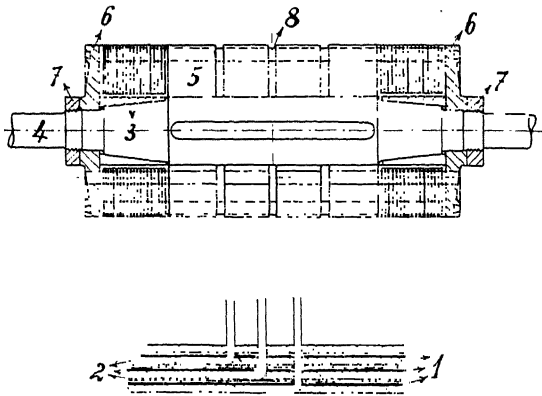



Fig. 69. Siehe auch E. P. 13051 (Jahr 1904).

kant liegen. Die Fig. 71 zeigt einen Wasserhaltungsmotor mit Schleifringanker von Lahmeyer, Frankfurt, für den folgende Daten gelten:

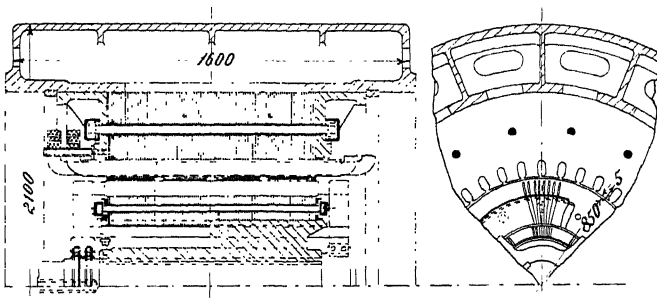



Fig. 70. Maschinenfabrik Oerlikon, 1200 KVA. 1500 Touren.

Förderquantum der Pumpe cbm in der Minute . .		5
Förderhöhe	m	620
Leistung des Motors	PS	520
Umdrehungen in der Minute		1500
Spannung	Volt	5000
Wechselzahl		100

Polzahl			4
Primäranker	Durchmesser	mm	1000
„	Breite inkl. Ventilationsschlitze	„	800
„	Bohrung	„	680
	Nutenzahl		60
„	Draht	mm	5,0; 5,9
„	Widerstand pro Phase	Ohm	0,69
„	cos φ		0,94

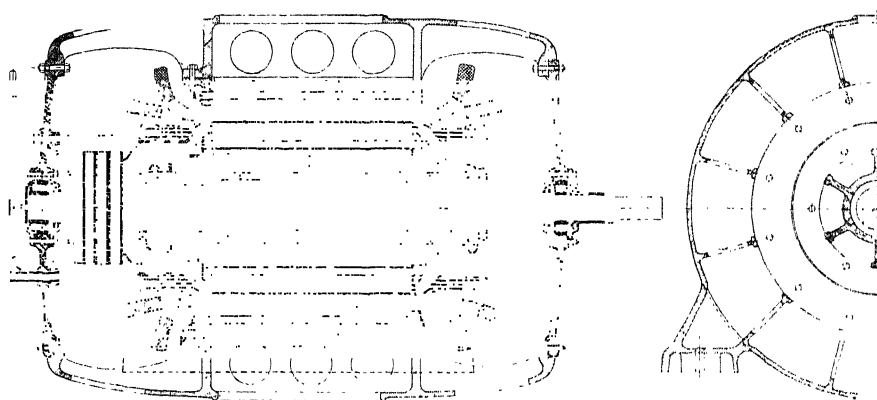



Fig. 71. Lahmeyer-Frankfurt.

Sekundäranker	Durchmesser	mm	674
„	Bohrung	„	450
„	Phasenzahl		3
„	Nutenzahl		84
„	Draht	mm	9 × 11
„	Widerstand pro Phase	Ohm	0,0192
Schlüpfung		%	1,25
Wirkungsgrad		%	95,1

Der Motor hat Lagerschilder, Kugellager und Metallkappen über den Rotorverbindungen.

Der Drehstrommotor der A. E. G. (Fig. 72) leistet bei 1035 Umdrehungen und 5000 Volt 600 PS, seine Hauptabmessungen sind nachstehend gegeben:

Bohrung (Stator)	850	mm
Eisenbreite	490	
3 Luftschlitze	20	
Polzahl	6	
Kranzstärke Stator } radial	170	mm
„ Rotor } radial	105	
Nutentiefe Stator	38	
„ Rotor	19	
Nutenbreite Stator	28	
„ Rotor	8,4	

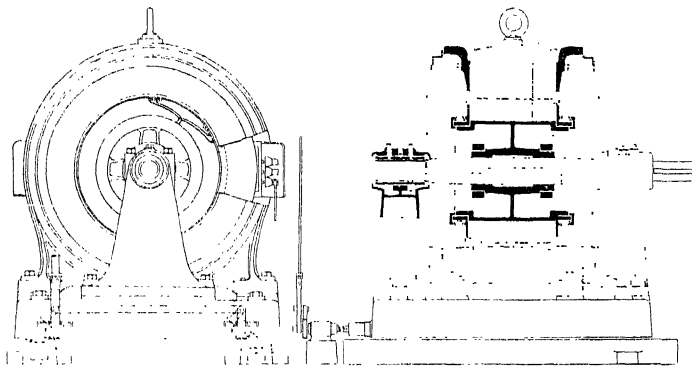



Fig. 72.

Nuten pro Pol und Phase, Stator	5	
Drähte pro Nut	7	
Schaltung	Y	
Nuten im Rotor	126	
Stäbe pro Nut	1	
Stabquerschnitt	185	mm^2
Luftzwischenraum	1,85	mm

Die Statorbleche sind nur durch zwei Gusswangen gehalten.*)

Die österr. A. E. G.-Union befestigt die Stirnverbindungen eines Drehstrommotors für 250 PS, 1500 Touren durch Klammern an einem Tragflansche (Fig. 73 und 74).

*) Glückauf, 1904, S. 1085.

Im Aufbau mit den Induktionsmotoren übereinstimmend ist der Asynchrongenerator, der aber bis jetzt weder als Turbogenerator noch sonst nennenswerte Verbreitung gefunden hat.

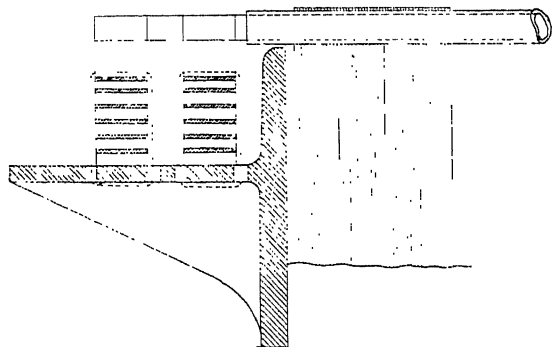
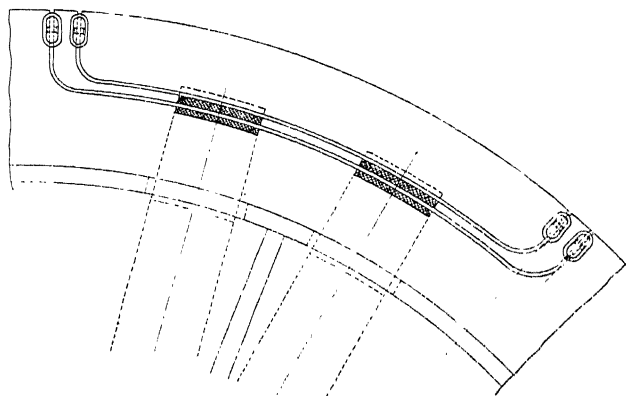



Fig. 73.

Durch Anwendung eines Erregerkommutators liesse er sich kompoundieren, wodurch man wesentlich an Feldkupfer sparen könnte. Diese Drehstrom*kompoundierung* mit einem Kommu-

74.

tator sowie drei Strom- und drei Spannungstransformatoren ist aber recht kompliziert und kapriziös, obwohl die grosse Kupfermenge, welche zur Erzielung einer einwandsfreien Spannungsregulierung auf dem Felde erforderlich ist, die Anwendung einer Kompoundierung der Drehstrom-Turbogeneratoren

besonders nahe legt. Bei der geringen Polzahl der Turbodynamos ist die Kompoundierung der direkt gekuppelten Erregermaschine*) am zweckmässigsten. Die Erregermaschine muss

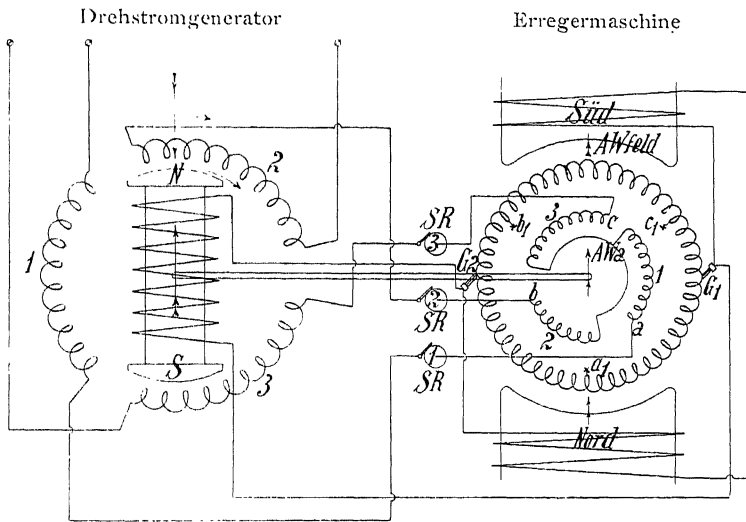



Fig. 75.

ebensoviel Pole wie der Generator haben, der Hauptstrom wird direkt oder durch einen Serientransformator in die Ankerwicklung des Erregers geschickt (Fig. 75 und 76); die Anschlüsse erfolgen so, dass der Hauptstrom im Generator und Erreger

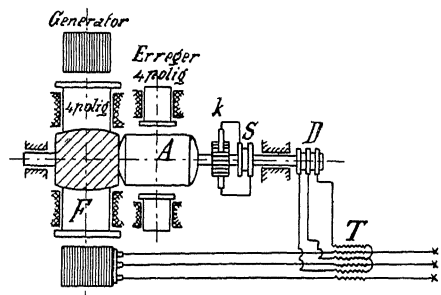



Fig. 76.

um 180° verschobene Dreh-AW = AW_a erzeugt, d. h. wenn die Ankerrückwirkung AW_a im Generator den Feld-AW ent-

*) Niethammer, Elektr. Maschinen und Apparate (Oldenburg) S. 34. Kompoundierte Drehstromgeneratoren neigen mehr zum Pendeln als gewöhnliche; die kompoundierenden Erregerleitungen parallel arbeitender Maschinen müssen durch drei Ausgleichsleitungen verbunden werden, d. h. der Verkettungspunkt von T (Fig. 76) ist zu öffnen.

gegenwirkt, wirkt sie im Sinne der Feld-AW des Erregers. Die Leitungen 1, 2, 3 (Fig. 75) brauchen nicht notwendig an eine besondere Ankerwicklung abc angeschlossen zu sein, sondern können direkt in a_1 b_1 c_1 an der Gleichstromwicklung liegen.*)

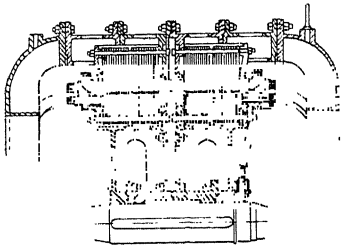



Fig.

Da die feststehenden *Statoren* der Turboalternatoren sehr lang werden, so kann es angezeigt erscheinen, die Statorbleche paketweise zusammenzupressen (Fig. 30a) und die einzelnen Pakete zum ganzen Stator zu vereinigen. Im äussersten Falle kann man auch Stator und Rotor nach Fig. 77 von Brown, Boveri & Co. in zwei

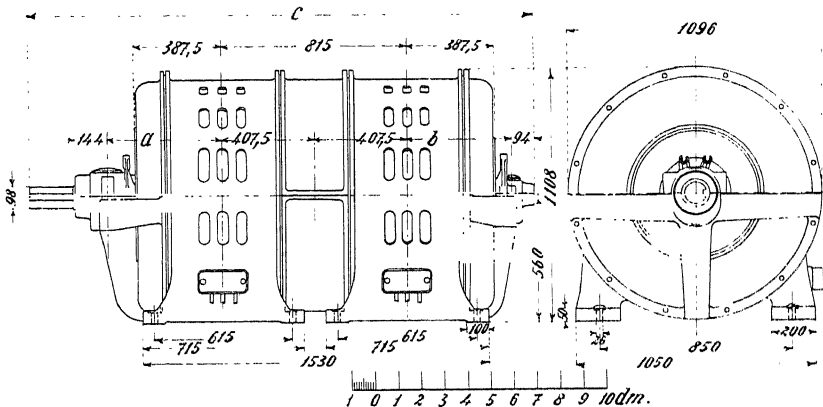



Fig. 77 a. Union E. G., 400 PS, 1500 Touren, vierpolig.

ganz getrennte Blechpakete unterteilen (Drehstrommotor für 1000 PS, 544 Touren) oder zwei Maschinen nach Fig. 77a zusammenbauen.

*) In der Z. f. E., Wien 1905, Heft 34 (20. August), habe ich auf S. 498 ein Schema eines kompoundierten Turbogenerators wiedergegeben. Das Feld der kompoundierten Erregerdynamo sollte nicht eigenerregt sein, sondern durch eine Batterie gespeist werden.

Die *Statorwicklung* unterscheidet sich kaum von der der gewöhnlichen Drehstromgeneratoren. Man findet sowohl offene wie geschlossene Nuten; erstere sind auch bei massiven Feldkörpern möglich, da der Luftspalt und die Nutzahl pro Pol in der Regel sehr gross sind. Das Einfädeln oder das Einschieben der Leiter in die langen Statornuten ist allerdings weniger einfach als das Einlegen der formgewickelten Spulen von oben herein. Von grösster Wichtigkeit ist es, die langen Stirnverbindungen der Statoren von Turbodynamos gründlich festzulegen, da sie sonst bei Belastungsänderungen und Kurzschlüssen sich verbiegen oder vom Rotor mitgenommen werden*) (Fig. 70, 78, die zu 31 gehört, und 79). Die Wickelei der A. E. G. Berlin für Turbodynamos zeigt Fig. 80.

Fig. 78.

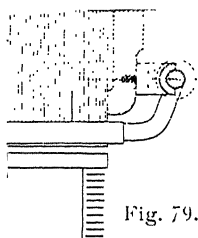
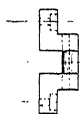
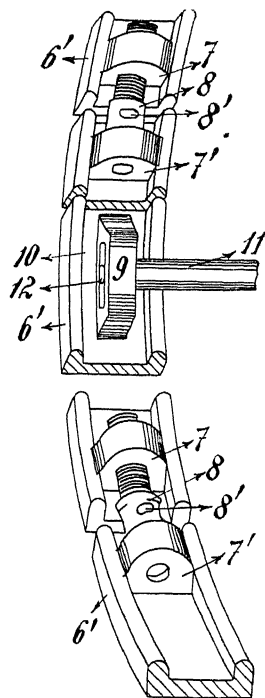



Fig. 79.

Die Schleifringe zur Zuführung des Erregerstromes bestehen aus zäher Bronze oder hartem Gusseisen oder Stahlguss. Als Bürsten findet man häufig Messinglaubbürsten, seltener auch Kohlenbürsten, die aber entschieden anzustreben sind. Es ist zweckmässig, je einen Schleifring links und rechts vom Feldkörper anzuordnen (Fig. 56). Häufig nützt sich ein Schleifring oder ein Bürstensatz bei den an sich rasch verschleissenden Metallbürsten mehr ab, als der andere, was durch eine Art elektrolytische Wirkung bedingt ist.

*) Man kann die Stirnverbindungen auch mit imprägnierten Holzklammern festlegen oder auf Isolatoren festbinden; siehe Z. f. E. Wien 1905, S. 497 (Heft 34) und E. T. Z. 1905, S. 806 (Fig. 40).

Man sollte es stets vermeiden, ein Ende der Erregerwicklung an die Welle zu legen, was von verschiedenen Firmen zur Ersparnis *einer* Leitung zwischen der Erregerwicklung und der direkt gekuppelten Erregerdynamo ausgeführt wird. Es treten dabei leicht zwischen Wellenzapfen und Lagerschale Spannungen von 5—20 V auf, welche durch Funkenbildung die Lagerschalen anfressen. Nachträglich kann dem Uebel

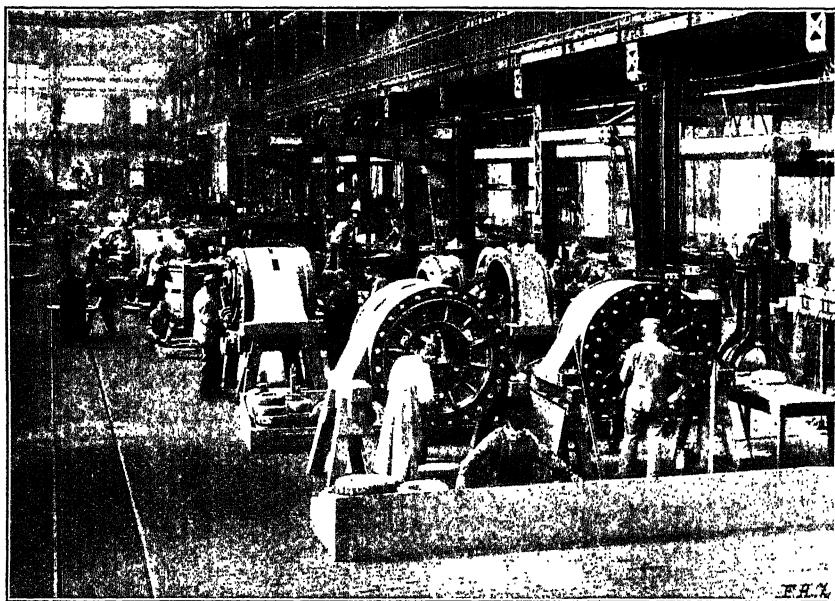



Fig. 80. Wickelei der A. E. G. Berlin.

dadurch abgeholfen werden, dass man auf der Welle eine an Erde liegende Bürste schleifen lässt.

Die Bürsten müssen dauernd soliden Kontakt auf den Schleifringen herstellen und nicht abgeschleudert werden. Die A. E. G. Berlin erreicht dies z. B. nach D. R. P. 154261 durch Verwendung von Doppelbürsten (Fig. 81). Sollte eine Bürste abspringen, so wird eine andere umso mehr angepresst. Um die Auflagefläche der Bürsten zu verbessern, hat die A. E. G.

die Schleifringe in Fig. 10 mit konischen Rillen versehen. Die A. E. G. falzt nach Fig. 82 (D. R. P. 154671) mehrteilige Ringe ineinander und versetzt die Trennfugen gegeneinander.

Fig. 81.

Nach dem öster. Patent No. 16416 ziehen Siemens & Halske die Schleifringe auf konische Flächen auf (Fig. 83). Für ein dauernd gutes Rundlaufen ist es sehr zweckmässig, die Schleifringe auf konischen Pressflächen zusammenzupressen, wie dies z. B. von der Westinghouse Co. nach Fig. 84 ausgeführt wird.*) Am üblichsten ist es, die Schleifringe *warm* auf die Welle aufzuziehen, welche durch einen beiderseits reichlich überstehenden 2 mm starken Glimmerzylinder isoliert wird. Siehe auch das bei Gleichstromdynamos über „Bürsten" Gesagte.

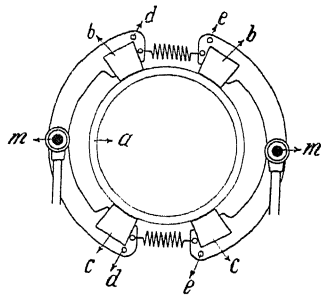
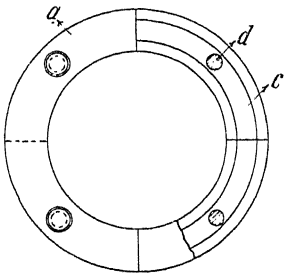



Fig. 82.

Da zwei die geringst mögliche Polzahl für Dynamos ist, so ist es ausgeschlossen, Turbodynamos bei 15 Perioden für mehr als 900 Touren pro Minute zu bauen, bei 50 Perioden für mehr als 3000, bezw. allgemein für mehr als 60 mal n (n = sek. Periodenzahl). Dieses Dilemma macht sich besonders bei kleinen Leistungen von 500 KW und weniger bemerkbar. Es gibt einige allerdings nicht sehr einfache Mittel, es zu umgehen:

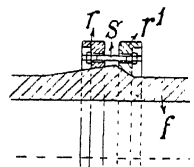



Fig. 83.

1. Parsons kuppelt nach dem E. P. 6734 (1902) mit der Dampfturbine c, Fig. 85, den Drehstromrotor a, dessen zwei-

*) Siehe auch Niethammer: „Mod. Ges. f. d. Entw. el. Masch. u. App.", Fig. 142, S. 116.

poliger Feldkörper b drehbar angeordnet und mit einem zweiten Drehstromrotor a_1 direkt gekuppelt ist. Der zweite Feldkörper b_1 steht fest. b_1 und a_1 drehen sich halb so rasch im gleichen Sinne wie a, so dass zur Erzeugung von n Perioden die Tourenzahl von a gleich $\frac{120\ n}{p}$ sein kann (p Polpaare).

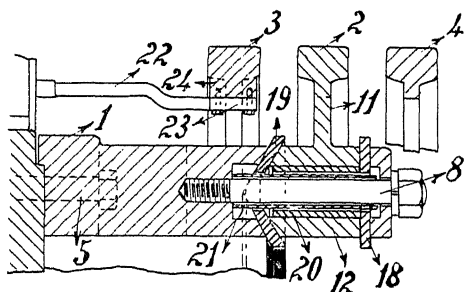



Fig. 84.

2. Das Lauf- und Leitradsystem der Turbine dreht sich im umgekehrten Sinn, je mit u Touren, was 2 u Touren bei stillstehendem Leitradsystem entspricht. Jede der beiden Wellen, Fig. 86, ist mit einer besonderen Dynamo gekuppelt (D. R. P. 150990). Parsons hat nach dem öster. Patent 19279 ebenfalls eine solche gegenläufige Turbine, Fig. 87, ausgebildet.

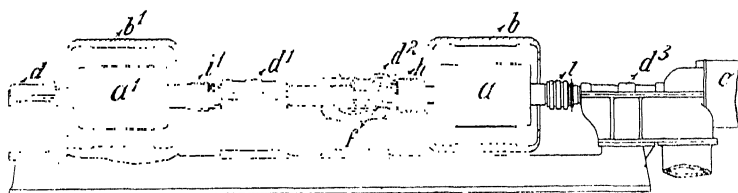



Fig. 85.

3. Denselben Zweck wie in Fig. 86 und 87 kann man auch rein elektrisch erreichen: man gibt dem Stator der Turbodynamo eine Drehstromwicklung, in der ein Drehfeld mit n_1 Perioden rotiert; wird der Rotor mit $n_2 > n_1$ Perioden angetrieben, so entstehen in seiner Drehstromwicklung Drehstromspannungen von der Periodenzahl $n_x = n_2 - n_1$. Ist $n_2 = 2\ n_1$, so wird $n_x = n_1$. Siehe das öster. Patent 20745 von J. Seidener auf einen Induktionsgenerator, dessen Stator und Rotor mit oder ohne Vermittlung von Transformatoren an dasselbe Netz

angeschlossen sind. Auch Ziehl hat in E. T. Z. 1905 Heft 27 einen solchen Generator (Doppelfeldgenerator) ausführlich besprochen.

Fig. 86.

Die grösseren Drehstrom-Dynamos der amerikanischen Lavalturbinen (50 bis 300 PS) werden nach Fig. 88 als Doppelgenerator ausgeführt, dessen zwei Einheiten gegen einander versetzt sind; es sind normale Innenpolmaschinen mit lamelliertem Feldkörper. Häufig sitzt auf der Verlängerung der beiden Generatorwellen je ein

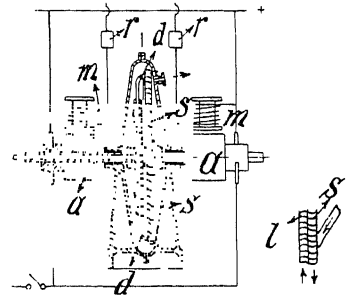
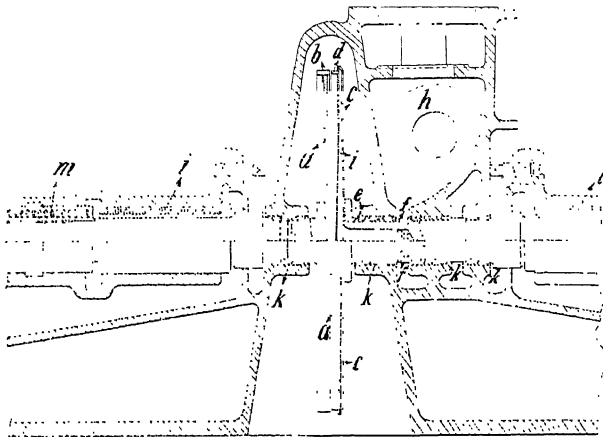



Fig. 87.

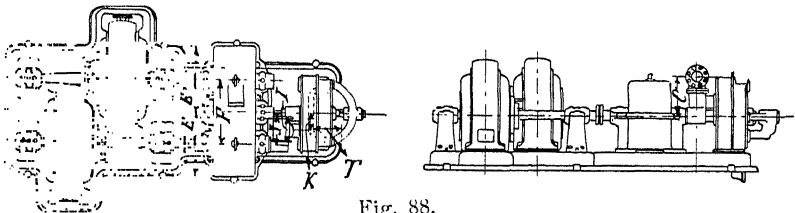



Fig. 88.

Erreger. In andern Fällen wird der Erreger durch Riemen von der Dynamowelle angetrieben oder es wird eine besondere Erregerturbine vorgesehen.

MECHANISCHE BEANSPRUCHUNG IN TURBO-ALTERNATOREN.

Die Beanspruchung sollte nicht höher als auf $\frac{1}{4}$—$\frac{1}{8}$ der Elastizitätsgrenze des verwendeten Materials gehen.

Der rotierende Teil eines Turboalternators kann im allgemeinen als geschlossener *Ring* (Jochring) aufgefasst werden, an dem die Pole und die Feldwicklung befestigt sind und der meist direkt auf die Welle aufgeschoben wird; nur in seltenen Fällen bei grosser Leistung und mässiger Tourenzahl kommt ein Armstern in Frage, der aber meist als volle Scheibe event. mit Ausparungen ausgebildet wird. Bei grösseren Durchmessern und hoher Tourenzahl ist eine Verbindung von Kranz und Nabe durch schmiedeiserne Scheiben oder Arme angezeigt. Für die Rotoren von Turbodynamos verwende man möglichst homogenen Schmiedestahl oder gestanzte Schmiedeisenbleche. Die maximale Beanspruchung eines frei rotierenden Ringes mit dem Innenradius*) r_i und dem Aussenradius r_a je in cm ist:

$$\sigma = \frac{u}{30} \cdot \frac{s}{128}\left[24\, r_i^2 + 104\, r_a^2\right] 10^{-5} \text{ in kg/c}^2 \qquad (1$$

u = minutliche Umdrehungen, s = spezifisches Gewicht *in kg pro cdm.*

Für den Fall, dass die radiale Höhe des Ringes klein ist, wird $r_i = r_a$ und falls $\frac{2\pi r_a}{60} u = v$ die Umfangsgeschwindigkeit des Ringes *in m/Sek.* erhält man

$$\sigma' = \frac{u}{30} \, s\, r_a^2 \, 10^{-5} = \frac{v^2}{10 \cdot \pi^2}\, s = 0{,}0102\, s\, v^2 \text{ in kg/c}^2.$$

*) Es ist nur unverletzte Fleischstärke zu rechnen.

Dagegen wird für kleine Werte von r_i bzw. für $r_i = 0$ im Falle die *mittlere* Umfangsgeschwindigkeit v_m des Ringes

$v_m = \frac{\pi r_a}{60} \cdot u$ *in m/Sek.*

$$\sigma'' = \left(\frac{u}{30}\right)^2 s \cdot \frac{104}{128} \cdot r_a^2 \cdot 10^{-5} = \boxed{0{,}033\, s\, v_m^2} \text{ in kg/c}^2. \qquad (3)$$

s = 7,2 für Gusseisen, s = 7,8 für Stahl und Schmiedeeisen, s = 8,5 für Bronze.

Fig. 89.

Die Formel (2) wird auch geschrieben

$$\sigma' = \frac{\gamma}{g}\, v \qquad (4)$$

$\frac{\gamma}{g}$ = spezifische Masse = $\frac{\text{kg pro cm}^3}{981}$, v = Umfangsgeschwindigkeit in cm.

Die Beanspruchung des Kranzes oder Jochringes ist jedoch grösser als die angegebenen Werte σ, σ' und σ'', da der Ring durch die Pole und Feldwicklung belastet ist.

Für ausgeprägte Pole ist unter Voraussetzung einer *Tourensteigerung von 10 %* gegenüber der Vollasttourenzahl u die Fliehkraft pro Pol in kg (Fig. 89):

$$G = 1{,}1^2 \frac{G_p + G_s}{9 \cdot 81} \left(\frac{2\pi R_p}{60}\right)^2 u^2 \frac{1}{R_p}$$

$$= 0{,}00112 \cdot 1{,}21\,(G_p + G_s) \cdot R_p \cdot u^2 \qquad (5)$$

G_p = Gewicht eines Poles samt Polschuh in kg.

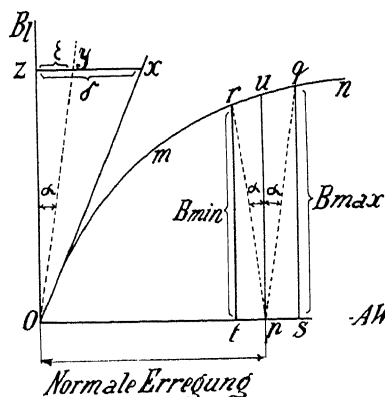
G_s = Gewicht einer Feldspule samt Isolation in kg.

R_p = Schwerpunktsradius für $(G_p + G_s)$ in m.

u = Umdrehungen pro Minute.

Fig. 90.

Ferner sei G_m = magnetischer Zug für einen Pol = $\left(\frac{B_{max}}{5000}\right)^2 F_p$, F_p = Polrandfläche pro Pol in cm²; die Induktion B_{max} im Luftspalt entnimmt man für die maximale Exzentrizität ε im Luftspalt δ aus Fig. 90.*)

$$G_c' = 0{,}00112\,[2p(G_p + G_s) + G_k]\,R_m \cdot 1{,}21 \cdot u^2 \text{ (in kg u. m).}$$

$$G_m' = 2p \cdot G_m^{**)} = 2p \cdot \left(\frac{B_{max}}{5000}\right)^2 F_p.$$

G_k = totales Kranzgewicht; 2p = Polzahl.

R_m = Schwerpunktsradius in m für Pole und Kranz:

$$R_m = \sqrt{\frac{2p\,(G_p + G_s)\,R_m^2 + G_k R_k^2}{2p\,(G_p + G_s) + G_k}}$$

*) Fig. 90 gibt in der Kurve o m n den Zusammenhang zwischen Erreger-Amperewindungen (AW) und Luftinduktion B_l; O X ist die Tangente an o m n im Ursprung O, sie gibt die AW zur Überwindung des Luftspaltes δ an. Mache z x ∥ O p und gleich δ und z y = ε (Exzentrizität des Luftspaltes), o p sei die normale Erregung und p u die mittlere Luftinduktion B_l, ziehe O y und parallel dazu p q, so ist das Lot q s = B_{max}.

**) Es ist etwas zu reichlich gerechnet, wenn man B_{max} für G'_m benützt, da die Luftinduktion nach Fig. 90 von B_{min} bis B_{max} variiert.

R_k = Schwerpunktsradius des Kranzes in m Fig. 89,
q_k = Kranzquerschnitt in cm^2.

Damit wird die totale im Jochring oder Kranz auftretende Zugbeanspruchung σ_k kg/cm², erzeugt durch die Fliehkraft der Pole, der Erregerwicklung und des Kranzes, sowie durch den gleichmässigen magnetischen Zug

$$\sigma_k = \frac{G'_c + G'_m}{2\pi q_k} \text{ in kg/cm}^2 \tag{6}$$

$\sigma_k \leq 200$ kg/cm² für Gusseisen.
$\sigma_k \leq 500$ kg/cm² für Stahlguss.

Für den Fall, dass keine ausgeprägten Pole, sondern in Nuten gleichmässig verteilte Erregerspulen (Fig. 55) benützt werden, ist zu setzen:

$2\,p\,G_p$ Gewicht des Materials ausserhalb des Zahngrundkreises (Zähne + Polschuhe).

$2\,p\,G_s$ Gewicht sämtlicher Erregerspulen (ohne Stirnverbindungen).

Sofern der Kranz nach Fig. 89 mit i Armen zusammengegossen wird, tritt extrem gerechnet im Kranz eine Biegungsbeanspruchung σ_k' kg/cm² auf

$$\sigma_k' = \frac{\frac{1}{i}\left(G_c' + G_m' + G_k\right)\frac{m}{12}}{W_k} \tag{7}$$

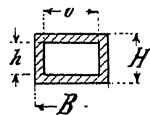
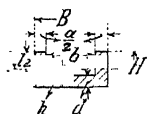
$$m \quad 2\pi R_k \quad \text{in cm.}$$

W_k Widerstandsmoment des Kranzquerschnittes. Für rechteckigen Querschnitt ist

$$W_k = \frac{1}{6}\,b\,h^2 \text{ in cm}^3.$$

Fig. 91.

Für Fig. 91 ist

$$W_k = \frac{B\,H^3 - b\,h^3}{6\,H} \tag{8}$$

ferner für Fig. 92

$$\Theta = \frac{1}{3}(B\, l_1^3 - b\, h^3 - a\, l_2^3)$$

$$l_1 = \frac{1}{2}\, \frac{a H^2 + b d^2}{a H + b d} \qquad (9)$$

Fig. 92.

$$W_n \qquad l_2 = H - l_1$$

$\sigma_k' \leqq 200$ kg/cm² für Gusseisen,
$\sigma_k' \leqq 500$ kg/cm² für Stahlguss.

Setzt man in Formel (7) $G'_m + G_k = 0$ und für G'_c die einfache Fliehkraft des Kranzes, so ergibt sich bei rechteckigem Kranzquerschnitt

$$\sigma'_k = 32\, \frac{G_k\, v^2}{i^2\, b\, h^2} = 0{,}1\, v^2 s\, \frac{R_k}{i^2 h} \qquad (7a)$$

an Stelle der Formel (2); v = mittlere Kranzgeschwindigkeit in m/Sek., s = spez. Gewicht (7,0—8,5), R_k = Trägheitsradius des Kranzes in m, h = Kranzhöhe in cm.

Werden die ausgeprägten Pole samt Polschuh und Wicklung mit dem Kranz *verschraubt* (Fig. 29 und 32), so sind pro Pol m Schrauben vom Kern-Querschnitt q_s erforderlich:

$$m\, q_s \geqq \frac{G_c + G_m + G_s + G_p}{k_z} \text{ (in kg u. cm).} \qquad (10)$$

k_z für Stahlschrauben < 500 kg/cm²; die Gewindetiefe sei 2,5 × Bolzendurchmesser.

Die Summe der m Schraubenquerschnittsflächen q_s (Kern) bei *aufgeschraubten Polschuhen* muss sein:

$$m\, q_s \geqq G_c + G_m + G_s + G_{ps} \text{ in kg u. cm.} \qquad (11)$$

G_{ps} bedeutet das Pol*schuh*gewicht; in dem Ausdruck für G_c ist auch das Pol*schuh*gewicht einzusetzen. Die Polschuhflansche werden durch die Fliehkraft G_c des Spulengewichtes

G_s und des Eigengewichtes G_{ps} auf Biegung beansprucht und zwar ist die Biegungsbeanspruchung im Querschnitt c d (Fig. 93) angenähert:

$$\sigma_f = \frac{\frac{1}{2}(G_c + G_s + G_{ps})\,a}{\frac{1}{6}\,x\,(y + y^1)^2} \text{ in kg/cm}^2. \qquad (12)$$

x, y und a siehe Fig. 93. Man setze $y = y'$.

Dieselbe Beanspruchung tritt auch bei Polschuhflanschen auf, die mit den Polen ein Stück sind, a ist dann kleiner (siehe Fig. 35), a = Flanschtiefe bis zum Pol.

Fig. 93.

Bei Schwalbenschwanzbefestigung der Pole (Fig. 93) ist die Biegungsbeanspruchung im Querschnitt a b:

$$\sigma_b = \frac{(G_c + G_m + G_s + G_p)\,h\,\mathrm{cotg}\,\alpha}{2 \cdot 2 \cdot \frac{1}{6}\,l\,h^2}$$

$$= 1{,}5\,(G_c + G_m + G_s + G_p)\,\frac{\mathrm{cotg}\,\alpha}{l\,h} \text{ in kg/cm}^2. \quad (13)$$

α ist meist $60 : 70^0$, d. h. $\mathrm{cotg}\,\alpha = 0{,}58 : 0{,}36$, l = axiale Länge.

Verwendet man m Schwalbenschwänze nebeneinander, so wird

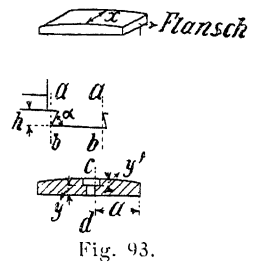
$$\sigma_b = \frac{1{,}5}{m}(G_c + G_m + G_s + G_p)\,\frac{\mathrm{cotg}\,\alpha}{l\,h} \qquad (14)$$

$\sigma_b < 500 : 900$ kg/cm² bei Stahl und Schmiedeisen, $\sigma_b < 200$ kg/cm² bei Gusseisen. Zu σ_b ist noch die Schubbeanspruchung

$$\tau = 1{,}5\,\frac{G_c + G_m + G_s + G_p}{h\,l} \qquad (15)$$

zuzuschlagen, so dass die totale Beanspruchung

$$\sigma'_b = 0{,}35\,\sigma_b \pm 0{,}65\,\sqrt{\sigma^2 + 4\,(\alpha_0\,\tau)^2} \qquad (16)$$

resultiert, $\alpha_0 = \sim 1$.

Werden die Pol*schuhe* durch Schwalbenschwänze befestigt, so ist in (13) und (14) G_p durch G_{ps} = Polschuhgewicht zu ersetzen, auch in dem Wert G_c ist G_{ps} statt G_p zu benützen.

Bei m Schwalbenschwänzen ist die Zugbeanspruchung in den Querschnitten g l (Fig. 94), l = axiale Länge:

$$\sigma_z = \frac{G_c + G_m + G_s + G_p}{m\, g\, l} \tag{17}$$

Fig. 94.

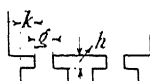



Fig. 95.

Dieselbe Formel gilt für Fig. 95, wobei für den Querschnitt h · l noch die Beanspruchung σ''_b zu ermitteln ist.

$$\sigma''_b = \frac{(G_c + G_m + G_s + G_p)}{2\, m \cdot \frac{1}{6}\, l\, h^2} \quad (18$$

Für σ_z und σ''_b gilt dasselbe wie für σ_b. Für Polschuhe, die für sich befestigt sind, gelten dieselben Formeln, falls G_p durch G_{ps} ersetzt wird.

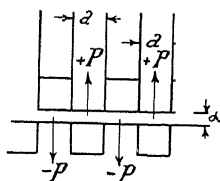



Fig. 96.

Für den Fall, dass die Pole mit dem Joch verzapft sind (Fig. 39), sind die durchgehenden Verbindungsbolzen auf Biegung und Schub zu berechnen. Nach Fig. 96 ist die Biegebeanspruchung runder Bolzen vom Durchmesser d

$$\sigma_b = \frac{0{,}5\, P \cdot a}{0{,}1\, d^3} \text{ in kg/cm}^2 \tag{19}$$

und die Schubbeanspruchung

$$\tau = \frac{}{\pi \; d^2} \text{ in kg/cm}^2 \tag{20}$$

Die resultierende Beanspruchung ist $\sigma = 0{,}35\, \sigma_b + 0{,}65 \sqrt{\sigma_b^2 \times 4\tau^2}$.

Sind die Bolzen rechteckig, so heisst der Nenner in (19) $\frac{1}{6}bh^2$, in (20) bh. Sind auf der ganzen Breite des Pols m Pakete und n Bolzen vorhanden, so ist

$$P = 2(G_e + G_m + G_p + G_s) : (m \cdot n) \tag{21}$$

Sind die Polschuhe verzapft, so ist G_p durch G_{ps} zu ersetzen.

Man ermittle übrigens auch die spezifischen Flächenpressungen in den Keilflächen Fig. 94 und in den Gewindegängen der Polschrauben.

Ist die Erregerwicklung gleichmässig in radialen Nuten verteilt, so wird jeder *Zahn* durch seine Fliehkraft und die der Wicklung pro Nut in der Zahnwurzel beansprucht durch die Zugbeanspruchung

$$\sigma_z = \frac{0{,}00112\ (G_z + G_w + G_e)\ R_z \cdot u^2 \cdot 1{,}21}{b_z \cdot l}\ \text{kg/cm}^2 \tag{22}$$

G_z = Gewicht eines Zahns in kg; G_w = Gewicht einer Hälfte einer Erregerspule, soweit sie in Nuten liegt, bezw. soweit sie nicht anderweitig gehalten wird; G_e = Gewicht des Nutkeils; R_z = Radius entsprechend Mitte Zahnhöhe in m, Fig. 97; b_z = Zahnbreite am Zahnfuss im cm; l = axiale Zahnlänge in cm.

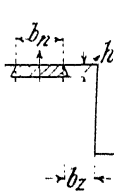
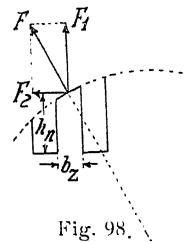



Fig. 97.

Sind die Nuten nicht radial, sondern nach Fig. 38 und 56 schräg gegen einen Radius ausgebildet, so ist die radiale Fliehkraft $F = 0{,}00136\ (G_z + G_w + G_e)\ R_z\ u^2$ in zwei senkrechte Komponenten F_1 und F_2, Fig. 98 zu zerlegen;

Fig. 98.

F_1 beansprucht die Zahnwurzel auf Zug $\sigma_z = \frac{F_1}{b_z\, l}$

F_2 jedoch auf Biegung $\frac{F_2 \cdot h_n}{\frac{1}{3}\, l\, b_z^2}$ (23)

Zudem wird durch F_2 die Wicklung leicht verschoben und die Isolation durchgescheuert. Diese seitliche Komponente F_2 tritt auch bei allen Feldkörpern mit ausgeprägten Polen auf und sucht die Spulen auszubauchen.

Die *Keile*, welche die Wicklung in den Nuten festhalten, werden auf Biegung beansprucht und zwar ist nach Fig. 97

$$\sigma_b = \frac{0{,}00112\,(G_w + G_e)\,R_z\,u^2 \cdot 1{,}21 \cdot b_n}{h^2\,l}\ \text{kg/cm}^2 \qquad (24)$$

b_n, h und l in cm, R_z in m, G_w und G_e in kg.

σ_b für Holz ≤ 100 kg/cm², für Bronze < 500 kg/cm² und für Aluminium $\leqq 200$ kg/cm².

Liegen die *Stirnverbindungen* der in Nuten verteilten Feldwicklung frei, so müssen sie durch Bandagen oder Schrumpfbänder oder geschlossene Metallzylinder (Bronze, Aluminium, Nickelstahl, Schmiedestahl o. a.) festgehalten werden. Ist das Gewicht der Stirnverbindungen pro Seite G_y und das Eigengewicht der Bronzekappe oder der Bandagen G_b, so ist die Zugbeanspruchung in einem Zylinder- oder Bandagenquerschnitt q_b $\left(\text{bei m Bandagendrähten von d mm } \phi \text{ ist } q_b = m \frac{d^2 \pi}{4}\right)$

$$\sigma_z = \frac{0{,}00112\,(G_y + G_b)\,R_x \cdot 1{,}2 \cdot u^2}{2\,\pi\,q_b} \qquad (25)$$

R_x = Trägheitsradius für $G_y + G_b$

$\sigma_z \leq 500$ kg/c² bis 1000 kg/c², je nach Güte des Bandagendrahtes oder der Bronze. Die Bandagen oder Schrumpfringe, bezw. Tragringe sollten nun möglichst mit einer Spannung aufgezogen werden, die dieser spezifischen Beanspruchung durch die Fliehkräfte entspricht, damit die Wicklung bei Lauf nicht locker wird, was bei Ringen schwer angeht.

Hat der Rotor einen Armstern, Fig. 89, so ist angenähert die Zugbeanspruchung der i Arme:

$$\sigma_a = \frac{\frac{1}{i}(G'_e + G'_m + G_k) + G''_c + G_a}{q_a} \text{ kg cm}^2 \qquad (26)$$

$G''_e = 0,00112\, G_a R_a 1,2\, u^2$ = Fliehkraft eines Arms bezw. Doppelarms vom Gewicht G_a und dem totalen Querschnitt q_a, R_a = Schwerpunkts-(Trägheits-)Radius der Arme. Die Biegungsbeanspruchung eines Arms, bezw. eines Doppelarms ist, $^1/_3$ der Arme als sicher tragend angenommen:

$$100\,000 \frac{KW}{u} \frac{l}{l+\rho} \frac{3}{i} \frac{1}{W_a} \text{ kg/cm}^2 \qquad (27)$$

$\sigma_a + \sigma_b < 200$ kg/cm² bei Gusseisen,

$\sigma_a + \sigma_b \leq 500$ kg/cm² bei Stahlguss;

KW = Leistung der Maschine in Kilowatt.

l, ρ siehe Fig. 89; i = Anzahl der Arme;

W_a = Widerstandsmoment eines Arms bzw. eines Doppelarms.

Bei elliptischem Querschnitt (x grosse, y kleine Achse) $W_a = 0,0982\, x^2 y$; bei rechteckigem Armquerschnitt (x Höhe, y Dicke) $W_a = \frac{1}{6} x^2 y$. $\frac{x}{y} = 2$ bis 3. Anlauf der Arme: Schmalseite (y) $\frac{}{200}$, Breitseite (x) $\frac{}{40}$

Ist der Rotor geteilt, was bei Turbodynamos selten vorkommt, so seien in der Ebene einer Trennfuge im ganzen, d. h. an den zwei Trennfugen am Kranz und den zwei Fugen an der Nabe

α Schrauben vom Kernquerschnitt q_s,

β Schrumpfringe vom Querschnitt q_r, sowie

γ Schrumpfbänder (oder Schliessen) vom Querschnitt q_c vorhanden.

Diese sämtlichen Querschnitte werden beansprucht durch die Zugkraft $\frac{G'_c + G'_m + i\, G''_c}{\pi} + \frac{G_k + i\, G_a}{2}$ d. h. es ist

$$k_z\,(\alpha\, q_s + 2\,\beta\, q_r + \gamma\, q_e) = \frac{G'_e + G'_m + i\,G''_e}{\pi} + \frac{G_k + i\,G_a}{2} \qquad (28)$$

$k_z \leqq 1000$ kg/cm². Der Schrumpfringdurchmesser d_s am Kranz sei $\geqq 0{,}16\sqrt{q_r\,k_z}$ an der Nabe $\geqq 1\frac{1}{2}$ mal Wellen Φ.

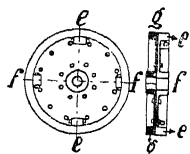



Fig. 99.

Eine sehr widerstandsfähige Teilung lässt sich nach Fig. 99 (D. R. P. 137441) dadurch erzielen, dass das Rad in zwei Scheiben geteilt ist, deren Trennfugen e e und f f versetzt sind.

Die mechanische Berechnung des *Gehäuses* ist bei Turbodynamos weniger wichtig, sie sei jedoch hier der Vollständigkeit halber aufgeführt. Es ist die Biegungsbeanspruchung σ_b kg/cm² des Gehäusequerschnittes, angenähert

$$\sigma_b = \frac{\frac{2\,r}{12}\left(\frac{G_f}{2} + \frac{G_z}{2}\right)}{W_m} + \frac{(G_f + G_z)\,\frac{1}{4}}{F} \text{ (in kg/cm}^2\text{)} \qquad (29)$$

$\sigma_b \leqq 400$ kg/cm² für Gusseisen. $2\,r$ = Schwerpunktsdurchmesser des tragenden Gehäuses, siehe Fig. 89. G_f = totales Gehäusegewicht; $G_z = \left(\frac{B_{max}}{5000}\right)^2 \cdot 2_p\,F_p : \pi$ = Projektion des gleichmässig auf einen Durchmesser des tragenden Gehäuses verteilten magnetischen Zuges für den Fall, dass überall im Luftspalt B_{max}, siehe Fig. 90, entsprechend dem kleinsten Lufspalt ($\delta - \varepsilon$) herrscht.

$W_m = \frac{\Theta}{e}$ = Widerstandsmoment des tragenden Querschnittes, siehe Fig. 89. F = tragende Gehäusequerschnittsfläche in cm² (aktives Eisen nicht oder nur halb rechnen).

Die grösste Gehäuse*einsenkung* f cm im Scheitel ist

$$f = c\,\frac{G_f + G_z}{\Theta}\,\alpha\, r^3 \text{ (in cm).} \qquad (30)$$

Θ = Trägheitsmoment des tragenden Gebäudequerschnittes; α = Dehnungskoeffizient

$$\frac{1}{0,9}\,10^{-6} \text{ bei Gusseisen, } \frac{1}{2,1}\,10^{-6} \text{ bei Stahlguss}\Big) \quad (30)$$

c kann, solange keine genauen Versuche vorliegen, = 0,005 gesetzt werden.

Für die α Stücke Befestigungsschrauben pro Teilfuge des Gehäuses gilt bei einem Kernquerschnitt q

$$\frac{1}{5500}\,\frac{G_f\,D}{l} \text{ (in kg u. cm).} \quad (31)$$

Fig. 100.

D = äusserer Gehäusedurchmesser und l aus Fig. 100.

ELEKTRISCHE UND MAGNETISCHE DIMENSIONIERUNG.

Die Umfangsgeschwindigkeit der Feldkörper mit ausgeprägten Polen und konzentrierter Feldwicklung liegt beim direkten Antrieb durch die jetzt bekannten Dampfturbinen etwa zwischen 60 und 80 m pro Sekunde; bei stark unterteilter Feldwicklung kann man sogar auf 80 bis 150 m pro Sekunde gehen. Mit der Wahl der Umfangsgeschwindigkeit ist der Durchmesser d am Luftspalt festgelegt. Die aktive Eisenlänge kann man dann nach der Beziehung

$$KVA = C \cdot d^2\, l\, u \quad (32)$$

aus der Grössenkonstante C entwickeln. (KVA = Leistung in Kilovoltampere, d = Durchmesser am Luftspalt, l = Eisenlänge, u = minutl. Touren, alle Masse in Meter). C ist für kleinere Turbogeneratoren etwa 0,5 und erreicht bei grossen Typen Werte bis gegen 1,5, während bekanntlich grosse Drehstrommaschinen mit mässiger Umlaufszahl Grössenkonstanten von 2 bis 3 zeigen. Die Grössenkonstante ist $C = \frac{1}{12}\,\frac{P}{\tau} \cdot AS \cdot B_l \cdot c \cdot 10$

wobei $\frac{P}{\tau}$ = Polbogen : Polteilung, AS = Ampereleiter pro cm

Umfang, B_l = Luftinduktion, c = Spannungsfaktor (1,8 : 2,3); bei Turboalternatoren ist demnach AS und B_l kleiner als bei üblichen Maschinen, $\frac{P}{\tau}$ ist wie sonst ca $^2/_3$. Da der Durchmesser d durch die Umfangsgeschwindigkeit sehr beschränkt ist, werden sich aus obiger Beziehung für KVA in der Regel grosse Werte der Länge l und auch eine grosse Polteilung τ ergeben. Die Polteilung τ wird bei Turboalternatoren für 25 Perioden 1200 bis 1600 mm, bei 50 Perioden 500 bis 900 mm.

Die Polzahl 2p bestimmt sich direkt aus der minutlichen Tourenzahl u und der Periodenzahl n (meist 50 oder 25) zu $2p = \frac{120\,n}{u}$; 2p muss eine ganze gerade Zahl sein, nach dieser Forderung ist u abzuändern. 2p ist praktisch 2, 4, 6, 8 und äusserst 10 oder 12.

Will man nun den Maschinenumfang durch die induzierte Wicklung genügend ausnutzen, so wählt man bei grösseren Typen AS = 100 bis 180 Amperestäbe pro cm Umfang, auf den effektiven Strom bezogen. Das führt zu Anker-AW pro Pol*) von der Grösse 4000 bis 10000 gegenüber nur 1500 bis 3000 bei mässig raschlaufenden Maschinen. Die weitere Folge ist die, dass auch die Feld-AW, die meist etwa das dreifache der Anker-AW sind, sehr beträchtlich werden. Es stellen sich wenig grosse Pole mit schweren Erregerspulen heraus, es entfallen oft 500 KW auf einen Pol, gegen 100 und weniger bei langsamlaufenden Typen. Zu der grossen AW-Zahl auf dem Felde gehört auch ein grosser magnetischer Widerstand. Da die Luftinduktion B_l mit Rücksicht auf den magnetischen Zug $\left(\frac{B_l}{5000}\right)^2$ F in kg, sowie auf die Induktion im Pol, die 14000 bis 16000 nicht übersteigen darf, kaum

*) AW = Amperewindungen.

grösser als etwa 8000 : 12000 im Maximum gewählt werden kann, so stellt sich notwendigerweise ein Luftspalt ein, der zwei- bis viermal grösser ist als bei mässig raschlaufenden Typen, d. h. man kommt zu einseitigen Luftspalten von 15 bis 50 mm. Ein Drehstromgenerator der Westinghouse Co. für 1000 KW, 1500 Touren, 25 Perioden, 2 Pole hat z. B. einen Luftspalt von 60 mm, eine Maschine für 5000 KW, 75 Touren nur 15 mm. Zwei andere Maschinen zeigen folgende Werte:

KW	Touren	δ
3500	75	12
3500	750	50

Im Interesse eines wirtschaftlichen Entwurfs ist allerdings auch bei Turbodynamos δ nicht grösser als 8 bis 20 mm zu machen. Bei Anwendung einer intensiven Kühlung ist es zulässig mit den Stromdichten der induzierten Wicklung auf 2,5 bis 3,5 A. pro mm^2 und in der Feldwicklung auf gegen 3 A. pro mm^2 zu gehen; besonders wichtig ist es jedoch, die Eisendichten im Statorrücken und in den Zähnen mässig zu halten, ersten Wert etwa 4000 bis 6000, den letzten etwa 8000 bis 15000 je bei 50 Perioden.*) Anderseits hat es keinen Zweck, die radiale Blechtiefe im Stator von der Zahnwurzel ab gerechnet viel grösser als etwa ein Drittel der Polteilung am Luftspalt zu machen, da die Kraftlinien wegen der grossen Weglängen doch nicht durch die weitabliegenden Blechteile verlaufen.

Die Zahl der Nuten pro Pol ist bei Turboalternatoren meist wesentlich grösser, als bei langsamlaufenden Typen, man findet häufig bei Dreiphasenstrom 4 bis 10 Nuten pro Pol und Phase. Da die Leiterzahl entsprechend dem grossen Flux pro Pol relativ klein ist, so lassen sich gewisse Turbodynamos für

*) Bei intensiver Kühlung sind im Rücken sogar Induktionen von 6000—7500 möglich.

Niederspannung überhaupt nicht bauen; bei 5000 bis 10000 KW sind Spannungen unter 1000 Volt kaum möglich, aber Span- bis 15 000 Volt.

Der Streukoeffizient des Feldkörpers $\frac{\text{Flux im Pol}}{\text{Flux im Anker}}$ ist bei der Innen- und Aussenpoltype ziemlich klein und liegt meist zwischen 1,1 und 1,2; verteilt man die Wicklung in einzelne Nuten, so dürfte er selten 1,1 nennenswert überschreiten, besonders wenn die Zähne aus unmagnetischem Material bestehen, obwohl der Unterschied bei magnetischen und unmagnetischen Zähnen nicht erheblich ist.

Die Form des von einem walzenförmigen Rotor erzeugten Feldes kann man trapezförmig annehmen mit τ als Basis und dem nutlosen Kreisbogen als obere Grundlinie.

Sind pro Pol m Feldnuten vorgesehen, ist die Nuthöhe ohne Keil h_n, die Keilstärke h_k, die Nutbreite b_n und die axiale Eisenlänge l, so sind die Feldstreulinien pro Pol angenähert

$$K_s = 2{,}5\ AW_f\ (h_n + 2\ h_k)\left[\frac{l}{m\ b_n} + 1{,}2\right] \qquad (33)$$

AW_f = Feld-AW pro Pol (ohne AW für Pol und Joch).

Bei Ermittlung der erforderlichen Feld-AW ist besonders auch die Streuspannung E_s der induzierten Wicklung zu berücksichtigen, sie ist namentlich bei hohen Polinduktionen von grossem Einfluss.

Die Streuspannung E_s pro Phase ist angenähert*)

$$E_s = 2\,\pi\,n\,L\,J = n\,Z^2\,(a\,l_e + b\,\tau)\,J\,10 \qquad (34)$$

L = Selbstinduktionskoeffizient pro Phase, n = Periodenzahl, Z = Leiter pro Phase, 2 p = Polzahl, l_e = effektive Eisenlänge, τ = Polteilung, a und b Koeffizienten, die stark von der Nutform und -zahl abhängen, im Mittel a = 5, b = 1,5; J = Strom pro Phase.

*) Genaueres siehe Niethammer, Handb. d. Elektrot. Bd. VI (2. Aufl.)

Ist E_k die Klemmenspannung pro Phase und φ der Phasenwinkel zwischen E_k und dem Strom J pro Phase, Fig. 101*), so addiere man zu E_k den ohmischen Abfall $J w \parallel J$ und $E_s \perp J$, woraus die E. M. K. E resultiert. Zu E gehören aus der Leerlaufcharakteristik AW_f an Amperewindungen, addiere dazu unter dem ∢ $(\varphi + \varepsilon + 90^0)$ die Ankerrückwirkung

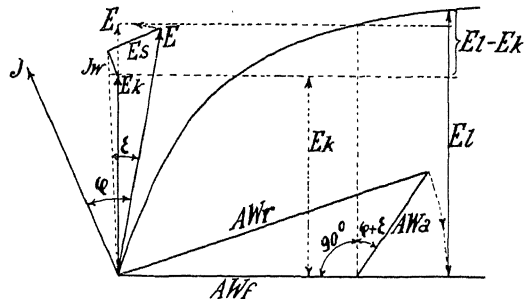



Fig. 101*).

$$AW_a = 0{,}58\, p'\, c' \frac{\sin\left(\frac{P}{\tau}\frac{\pi}{2}\right)}{P/\tau} \frac{J\,Z}{4\,p} \tag{35}$$

um die resultierenden Feld-AW = AW_r zu erhalten. p' = Phasenzahl, c'' = Breitenfaktor der Wicklung (meist 1 : 0,9), $\frac{P}{\tau}$ = Polbogen zu Polteilung, J = Strom pro Phase, Z = Leiter pro Phase, 2 p = Polzahl. Zu AW_r gehört bei Leerlauf E_l; $E_l - E_k$ ist die Spannungserhöhung beim Ausschalten der Vollast. Zur Verminderung der Quermagnetisierung sieht man wohl in den Polschuhen nach Fig. 101a Schlitze vor.

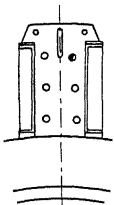



Fig. 101a.

Die Aussenpoltype mit rotierendem Anker hat den Vorteil, dass ihre Kupfer- und Eisenverluste relativ kleiner ausfallen, als bei der Innenpoltype, dagegen ist ihre ausstrahlende Oberfläche geringer.

In Fig. 101b gebe ich noch für einen 1500 KVA-Drehstromgenerator von Brown, Boveri & Cie. (1500 Touren, 3500 Volt) die charakteristischen Kurven.

*) In Fig. 101 ist φ der Winkel zwischen J und E_k, ε der zwischen E_k u. E. Die mit E, E_k und mit AW_f bezeichneten Geraden sind die Koordinatenachsen.

Nachstehend habe ich zwei Tabellen I und II ausgeführter oder projektierter hochtouriger, einphasiger und mehrphasiger Wechselstromerzeuger und Asynchronmotoren zusammengestellt.

Fig. 101 b.

Vergleich von Drehstromgeneratoren gleicher Leistung und verschiedener Tourenzahl:

a) 5000 KW, 25 Perioden

Touren	500	250	75
Durchmesser am Luftspalt	2200	3300	9600 mm
Achsiale Eisenlänge	1200	900	600 mm
Erbauer	Gen. El. Co. für eine Curtis-turbine	Gen. El. Co. zwischen die Niagaramaschin. interpoliert	Westinghouse Co. Schwung-radmaschine, New-York

b) Für 500 KVA, 50 Perioden

Touren . . .	3000	500	94
Durchmesser	600	1500	4800 mm
Eisenlänge .	740	450	170 mm.

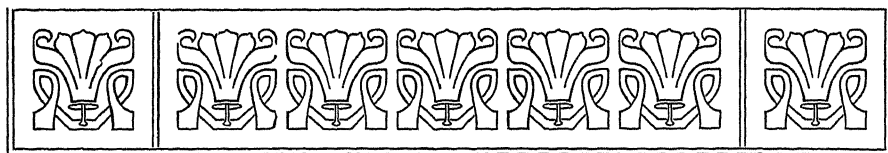
Von besonderem Interesse ist ein von Behrend gegebener Vergleich der Gewichte einer 1000-KW-Drehstrommaschine, wenn man sie für stark auseinanderliegende Tourenzahlen zu entwerfen hat:

Touren pro Minute .	100	250	800	1250	1600
Gewicht total . . .	32	23	15	18	27 t,

d. h. von 800 Touren ab *wächst* das Gewicht mit zunehmender Tourenzahl.

Ein 5000-KW-Drehstromgenerator wiegt:

bei 75 Touren . . . . 440 t
bei 750 Touren . . . . 105 t.

Die neuen Turbogeneratoren der Wiener Zentrale (Siemens-Schuckert-Werke) für 1000 PS, 8500 KVA, 1500 Volt, 960 Touren und 48 Perioden haben 6 ausgeprägte Pole, welche je in 2 runde massive Stahlzylinder mit Hochkanterregerkupfer zerlegt sind; äusserer Polraddurchmesser = 1660, axiale Eisenlänge = 1040 mm mit einem Lüftekanal = 50 mm; Flux pro Pol = $\backsim 40 \cdot 10^6$, $\delta = 20$ mm, AS = $\backsim 440$, Induktion im Eisenkern = 8000. Die Kühlung erfolgt durch Ventilatoren, welche die Luft *axial* durch das Statoreisen und das Feldrad führen.

GLEICHSTROMDYNAMOS.

KOMMUTIERUNGSPROBLEM.

Von grundlegender Bedeutung für den Entwurf von Gleichstrom-Turbodynamos ist die Forderung, einwandsfreie Kommutation d. h. funkenfreien Gang zu erzielen. Die Kommutierung bei hohen Tourenzahlen bietet derartige Schwierigkeiten, dass manche Firmen überhaupt keine Gleichstromturbodynamos, besonders keine grossen bauen oder aber dieselben bei gegebener Leistung wesentlich langsamer laufen lassen als Turboalternatoren, wodurch allerdings, in der Regel der Dampfverbrauch der Turbine vergrössert wird. An und für sich liegt kein Bedarf für grosse Gleichstromdynamos vor, da grosse Netze meist mit hochgespanntem Drehstrom gespeist werden; Gleichstrom wird dann in Umformern erzeugt. Für grosse Turboanlagen dürfte sich tatsächlich die Erzeugung von Drehstrom und die Umformung, soweit sie erforderlich ist, aus Betriebs- und Preisrücksichten empfehlen und zwar noch mehr, wenn es gelingen sollte, billige, ruhende (nicht rotierende) Drehstromgleichstrom-Umformer zu bauen.

Die grössten Gleichstromturbodynamos haben bis jetzt in Europa wohl Brown, Boveri & Cie für Elberfeld gebaut, sie leisten 1500 KW bei 600 Volt und 1000 Touren; die Antriebsturbine für 10 000 PS treibt überdies einen Drehstromgenerator für 6250 KVA 5000 Volt an, sodass das Aggregat überhaupt die grösste gebaute Einheit darstellt. Die General Electric Co. New-York hat allerdings ausser mehreren 500- und 800-KW-

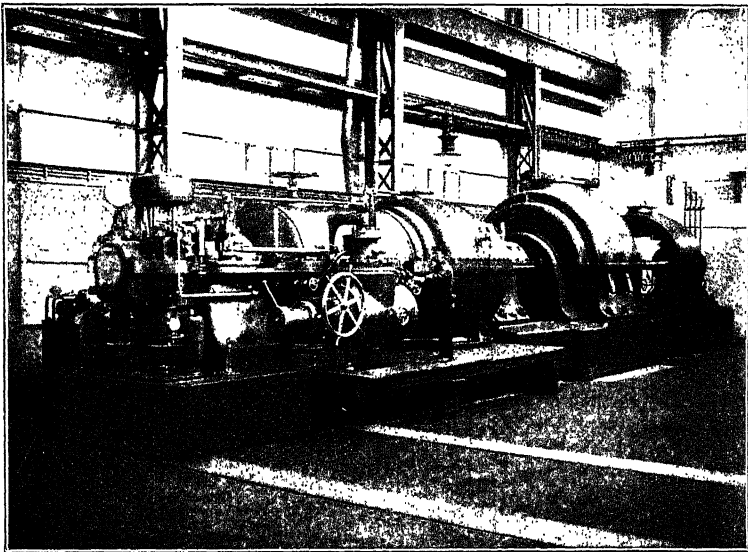



Fig. 102. Brown, Boveri & Co.
Drehstromgenerator für 6250 KVA und Gleichstromgenerator für 1500 KW je bei 1000 Touren.

Gleichstrommaschinen auch eine 2000-KW-Turbogleichstromdynamo hergestellt. Der erwähnte Doppelturbogenerator von Brown, Boveri & Cie. ist aus Fig. 102 ersichtlich; zuvorderst steht die Turbine, rechts davon zuerst der Drehstromgenerator und ganz rechts die kompensierte Gleichstromdynamo.

London beschreibt im Journal Inst. El. Eng. 1905, S. 180 (Juni) die erste 10 PS-Gleichstrom-Turbodynamo von Parsons aus dem Jahre 1884 für 18,000 Umdr. per Min.; der Anker-

durchmesser ist 76 mm, die Ankereisenlänge 120 mm, die totale Ankerlänge 250 mm, die Kommutatorlänge 139 mm, der Kommutatordurchmesser 63 mm. Der Anker trägt eine glatte Wicklung aus Rundstäben in *einer* Lage, die durch eine durchgehende Stahldrahtbandage gehalten werden. Der Kommutator ist in der Längsrichtung 8 mal unterteilt und jedes dieser 8 kurzen Stücke ist in 2 Schwalbenschwänzen gehalten, d. h. es sind 8 gewöhnliche Kommutatoren ineinander geschoben.

Mit Rücksicht auf die Kommutierung kann man unterscheiden:

Gewöhnliche Gleichstrommaschinen derselben Bauart wie langsamlaufende Typen, nur elektrisch und mechanisch sorgfältiger ausgelegt;

Kompensierte Maschinen mit Hilfswicklungen oder Hilfspolen zur Erzeugung eines geeigneten Kommutierungsfeldes;

Ausser der mittleren Spannung ($e_m < 12 : 15$ Volt) pro Kommutatorsegment = Klemmenspannung dividiert durch die Segmentzahl zwischen 2 benachbarten Bürstensätzen sowie dem Verhältnis*) AW für Luft und Zähne : Anker-AW pro Polbogen, das möglichst nicht kleiner als 1,5 sein sollte, ist zur Beurteilung der Kommutierung von ausschlaggebender Bedeutung die

Reaktanzspannung e_r der durch die Bürsten kurzgeschlossenen Spule

$$e_r = \frac{v_1}{s_b} \left(\frac{Z}{2\,k} \right)^2 \left[c_1 l_e + c_2 \tau \right] J_z \cdot 10^{-} \qquad (36)$$

v_k — Kommutatorgeschwindigkeit, s_b = Bürstendicke, $Z : 2\,k$ Windungen pro Kommutatorsegment, l_e = aktive (axiale) Eisenlänge, τ = Polteilung, J_z = Strom pro Zweig, im Mittel ist c_1 15, $c_2 = 3$; die Formel gilt genau nur für Schleifenwicklung, c_1 und c_2 hängen stark von der Nutenform und Wicklung ab.

*) AW = Amperewindungen.

Man kann auch schreiben:

$$e_r = (k_1 l_e + k_2 l_s) \frac{Z}{2k} J_z \cdot k u \cdot 10^{-} \qquad (36a)$$

k = Lamellenzahl, u = min. Drehzahl, 2 p = Polzahl, 2 a = parallele Zweige, $k_1 = 0{,}8 \div 1{,}5$, $k_2 = 0{,}1 \div 0{,}3$, l_s = freie Wickellänge pro Leiter. Masse für (36) und (36a) in cm.

e_r soll für funkenfreie Kommutierung kleiner als 2 bis 3 Volt sein. Man kann nun e_r an sich so klein halten oder grössere Werte von e_r durch eine entgegengesetzte EMK e_a, die durch ein geeignetes Hilfsfeld erzeugt wird, kompensieren, so dass $e_r - e_a$ 2 bis 3 Volt wird. Bei den üblichen hohen Drehzahlen von Turbodynamos ergeben sich Reaktanzspannungen von 5 bis 20 Volt. Die Mittel, die Reaktanzspannung an sich klein zu halten sind folgende: Geringe axiale Ankereisenlänge l_e, was zu hohen Umfangsgeschwindigkeiten führt, kleiner Strom J_z pro Ankerzweig d. h. grosse Anzahl Kommutatorsegmente, was eine hohe Kommutatorgeschwindigkeit nötig macht; weiterhin ist die Verwendung nur einer Windung pro Segment, ferner einer *glatten* Ankerwicklung oder möglichst seichter breiter Nuten und hoher Zahnsättigung angezeigt. Hohe Polschuhsättigung bzw. Schlitze in den Polen und Polschuhen verringern ebenfalls die Verzerrung des Hauptfeldes. Auch bei sorgfältigstem Entwurf einer solchen Turbodynamo dürfte eine beträchtliche Bürstenverstellung zwischen Leerlauf und Vollast erforderlich sein, insbesondere weil meist Metallbürsten verwendet werden müssen.

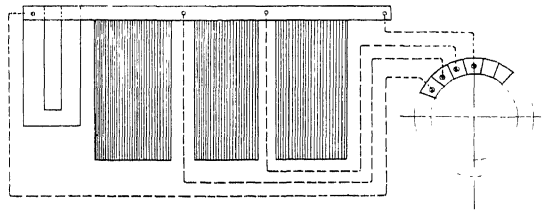



Fig. 103.

In dem E. P. 11471 vom Jahre 1904 ist für Gleichstromturbodynamos die Ausführung (Fig. 103) angegeben. Es wird

jeder Leiter noch mehrmals unterteilt und die einzelnen Stücke verbindet man je mit besonderen Kommutatorsegmenten, wodurch die Reaktanzspannung wesentlich erniedrigt wird.

Hüllt man die Ankerleiter, besonders die Stirnverbindungen in Metall- (Kupfer-) zylinder ein, so lässt sich ein Teil des selbstinduzierten Feldes und damit der Reaktanzspannung wegdämpfen. Die Schüttorfer Maschinenfabrik*) unterteilt das Ankereisen in axialer Richtung, nicht senkrecht zur Achse, wodurch der Widerstand des selbstinduzierten Feldes erhöht wird. Parsons hat als Ankerleiter zur Erzielung eines kleinen Selbstinduktionskoeffizienten die hohlen Kabel (Fig. 104) auf einem glatten Anker vorgeschlagen.

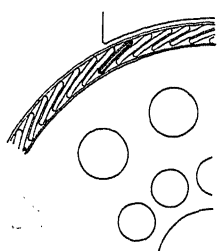



Fig. 104.

Grosser Widerstand in dem unter den Bürsten kurzgeschlossenen Stromkreise gestaltet ebenfalls die Kommutierung günstiger**); deshalb wählt man öfters die Kommutatorverbindungen aus Nickelin o. ä. und benützt Kohlenbürsten, die auch geringere Bürstenverstellung erheischen als Metallbürsten. Kohlenbürsten sind aber nur für Kommutatorgeschwindigkeiten kleiner als 20 bis 25 m/Sek. angängig, da sie bei höheren Geschwindigkeiten abgeschleudert werden und dann leicht zu Überschlägen von Pol zu Pol Veranlassung geben. Man hat auch versucht, Kohlenbürsten für Turbodynamos in kleine Blöcke zu unterteilen, die nicht alle gleichzeitig abgeschleudert werden können, überdies kann man zwischen die einzelnen Blöcke Widerstände legen. Am ehesten sind für Turbodynamos ausser Metallbürsten Kupferkohlenbürsten (Fig. 104a) angängig.

*) Elektr. Maschinen und Anlagen (Niethammer) Bd. I, S. 171, Fig. 240.

**) Über weitere Hilfsmittel zur Verbesserung der Kommutierung (Längs- und Querschlitze in den Polen, siehe Abb. 101a, hohe Polschuh- und Zahnsättigung) siehe Niethammer, Elektrische Maschinen und Anlagen Bd. I, S. 157.

In gewissen Fällen wird es zur Ermöglichung einwandfreier Kommutation vorteilhaft, Turbodynamos mit Doppelkommutator zu versehen, um die Stromstärke pro Bürstenspindel zu verringern; dasselbe wird in vollkommenerer Weise durch Unterteilung in zwei nebeneinander gekuppelte Dynamos von halber

Fig. 104 a.

Fig. 104 b.

Leistung erreicht (Tandemdynamos), siehe „Dampfturbinen" Fig. 47. Bei mehr als zwei Polen ist, sofern nicht Kompensationswicklungen für die Ankerrückwirkung vorgesehen sind, wobei Wellenwicklung angezeigt sein mag, nur Schleifenwicklung zu verwenden, es kann sogar doppelte Parallelschaltung mit doppelt soviel Ankerzweigen wie Polen ($2a = 4p$) zur Verringerung der Spannung pro Segment von Nutzen sein; die Reaktanzspannung ist allerdings bei $a = 2p$ nicht wesentlich

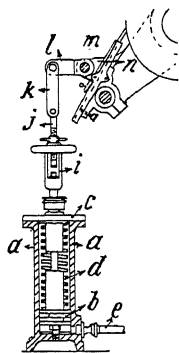
anders als bei a = p*). Bei Schleifenwicklung sind stets (von 4 Polen aufwärts) 5 oder mehr Ausgleichsringe oder Ausgleichsverbindungen (Gabeln) anzubringen, siehe R Fig. 104 b der Maschinenfabrik Oerlikon: 20 Ausgleichringe von 2 × 10 mm für eine 6-polige Maschine 600 Volt, 550 Amp., 370 Touren, a = p, Leiterquerschnitt 1,8 × 20.

Thury verwendet mechanische und elektrische Funkenausblasevorrichtungen z. B. Druckluft, die von innen zwischen die Lamellen geblasen wird, oder aber parallel zu den Lamellen geschaltete Kondensatoren, welche die Selbstinduktion neutralisieren oder den Extrastrom aufnehmen.

Fig. 105.

Die EMK e_a zur Kompensation der Reaktanzspannung kann erzeugt werden:

a) durch automatische Bürstenverstellung

α) entsprechend dem mittleren Dampfdruck d. h. entsprechend der Belastung, Fig. 105 (Parsons), siehe E. P. 9203 (Jahr 1900),

β) entsprechend dem variablen Strom (Thury),

γ) entsprechend der Spannung zwischen einer Hauptbürste und einer ganz schmalen Hilfsbürste, die mit der ablaufenden Bürstenspitze in einer Flucht liegt (Spannung zwischen Lamelle und ablaufender Bürstenspitze), siehe E. P. 3777, Jahr 1903 von Siemens Bros.**) In allen drei Fällen ist es wichtig, dass durch geeignete Polschuhabschrägung ein flach abfallendes Hauptfeld geschaffen wird;

b) durch Variation des Streufeldes, das die kurzgeschlossene Spule trifft. Man kann z. B. das ganze Polgehäuse

*) Siehe Niethammer, Elektrische Maschinen und Anlagen Bd. I, S. 163. Reihenparallelschaltung mit a = 2 p ist dagegen zu vermeiden.

**) Siehe Niethammer, Elektrische Maschinen und Anlagen, Bd. I, S. 172, Fig. 241 a und b.

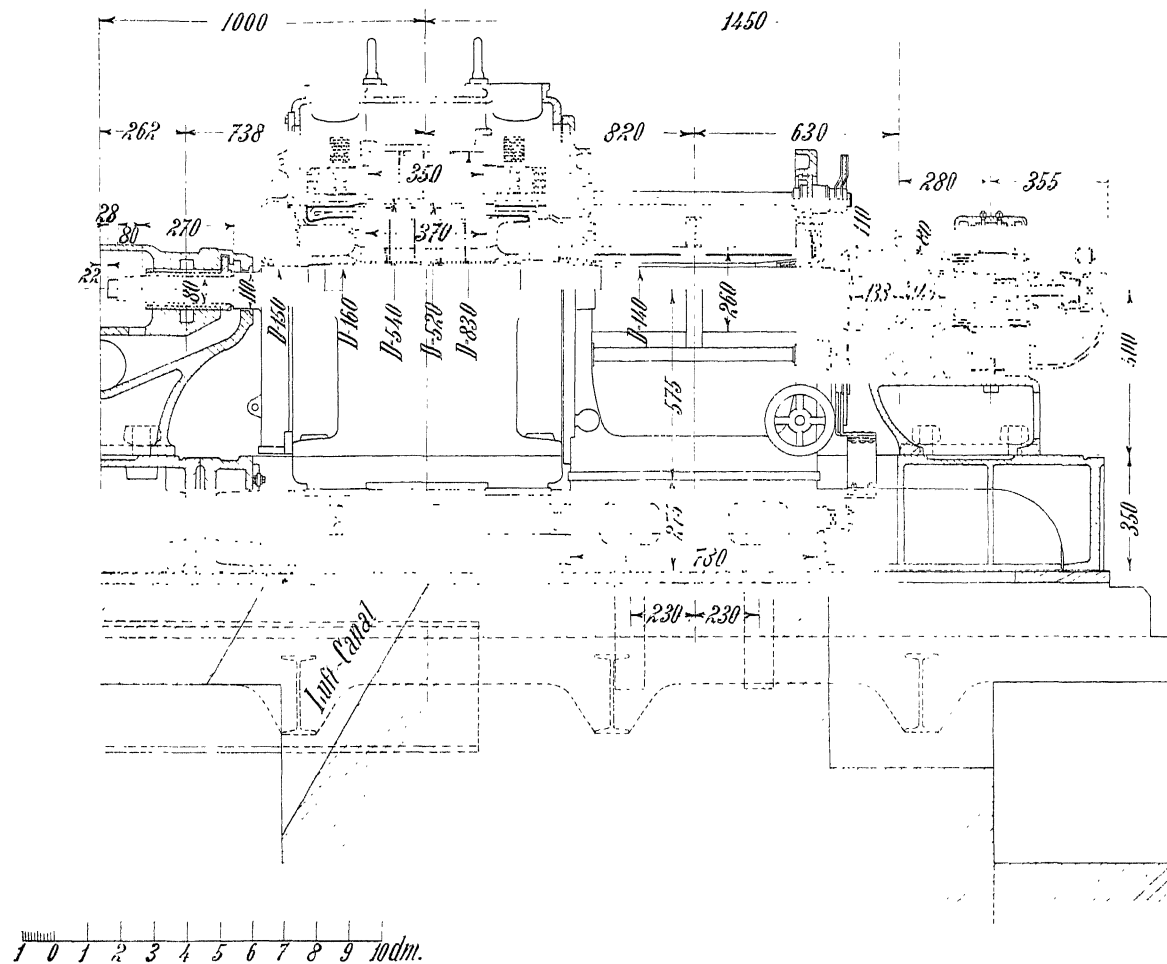
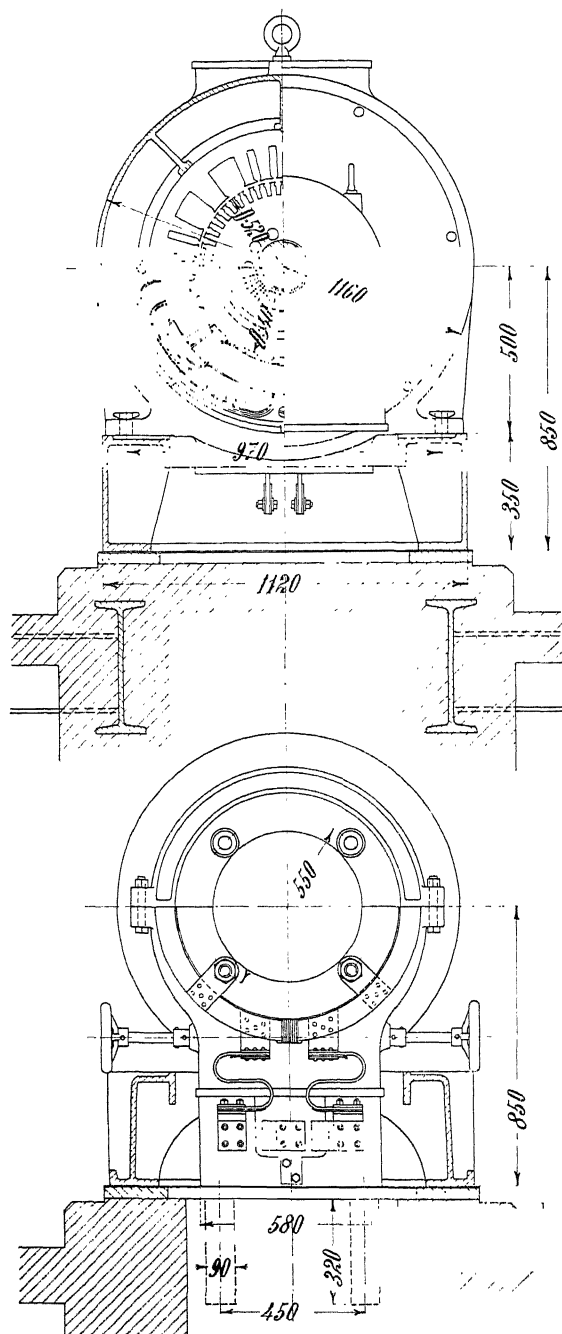



Fig. 117. Brown, Boveri & Co., 250 KW, 2700 Touren, 150 Volt.

drehbar anordnen, oder die Polschuhspitzen P (Fig. 105a) oder unbewickelte Hilfspole gegenüber der kurzgeschlossenen Spule S entsprechend der Last verstellbar einrichten; bezüglich Fig. 105a siehe das öster. Patent No. 20678 von Siemens & Halske (Pichelmayer).

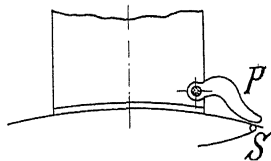



Fig. 105 a.

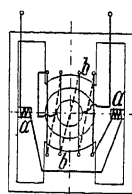



Fig. 106.

c) durch Hilfspole, Wendepole oder Kommutierungspole*) gegenüber den kurzgeschlossenen Leitern (Pole a in Fig. 106, Fig. 107 – 110), dieselben werden vom Hauptstrom erregt;

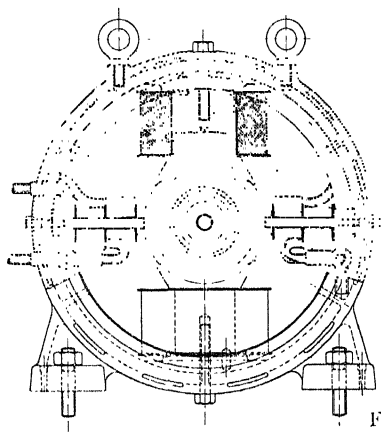
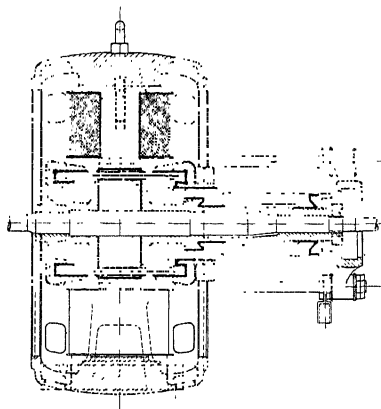



Fig. 107.
Lahmeyer - Frankfurt, 30 KW, 5000 Touren, 110 Volt.

d) durch verteilte Hilfswicklungen auf dem Feld (Fig. 111 bis 117, 106), die sowohl die Ankerrückwirkung wie die Reaktanzspannung aufheben (Ryan, Déri) und deshalb am vollkommensten wirken. Gegenüber den kurzgeschlossenen Spulen ist ein Kommutationszahn

*) Siehe E. T. Z. 1905, S. 640.

(Fig. 111) ausgespart, der die Reaktanzspannung aufhebt. Auch Parsons verwendet neuerdings eine verteilte Kompensationswicklung nach Fig. 118, die patentiert

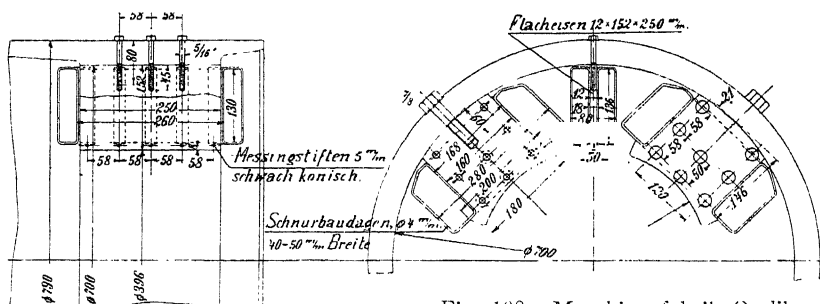
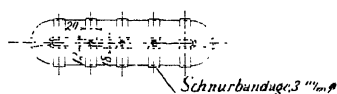



Fig. 108. Maschinenfabrik Oerlikon.
40 PS, 530—1080 Touren, 500 Volt.

ist. In Fig. 106 ist die Wirkung einer solchen Kompensationswicklung in ihre zwei Elemente: Hilfspole a und Quer-AW b zerlegt. Auch in Fig. 116 und 116a der Maschinenfabrik Oerlikon ist ein Hilfspol S mit einer verteilten

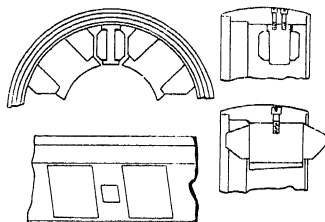
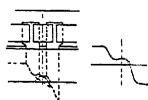



Fig. 109. Fig. 110.

Kompensationswicklung K kombiniert; F ist die Erregerwicklung. In dem Schweiz. Patent 32080 kombinieren die Siemens-Schuckert-Werke die Hauptfeld- und die Kompensationswicklung miteinander und legen sie geneigt zum Hauptfeld und zum Ankerfeld.

e) durch Hilfswicklungen auf dem Anker; in die Verbindungen zwischen der Ankerwicklung und dem Kommutator werden Windungen gelegt, die auf einem Hilfsanker liegen; diese Windungen sind entweder gegen

die Hauptwicklung vorgeschoben, so dass sie während des Kurzschlusses einer Spule der Hauptwicklung unter

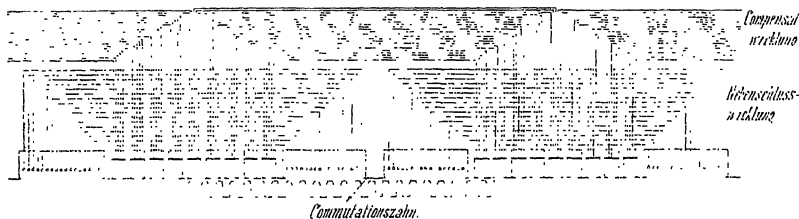



Fig. 111.

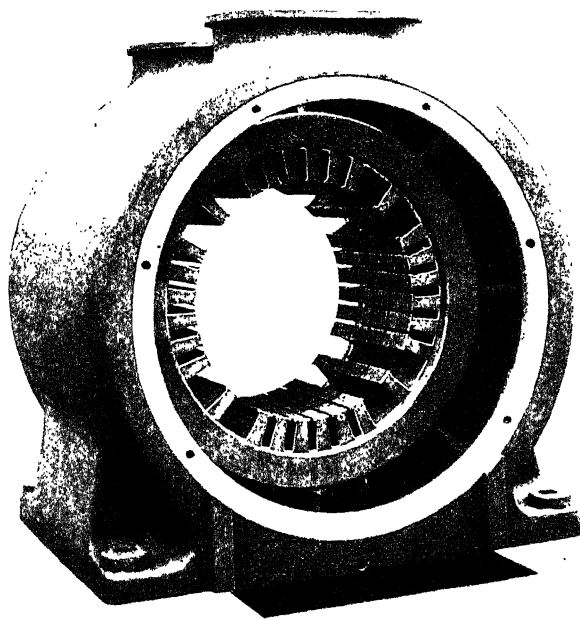



Fig. 112. Brown, Boveri & Co.

einer Polspitze liegen und so induziert werden, dass $e_a = e_r$ wird (Sayers), oder aber sie werden durch ein besonderes vom Hauptstrom erregtes Hilfsfeld*) (h_s, h_n in Fig. 119 und 119a) induziert (Seidener).

*) Diese Methode ist bereits im E. P. 11604 (Jahr 1904) angegeben.

Diese Anordnung *(e)* kann man im Gegensatz zu allen anderen mit „Aussenkommutierung“ bezeichnen, die übrigen mit „Innenkommutierung“.

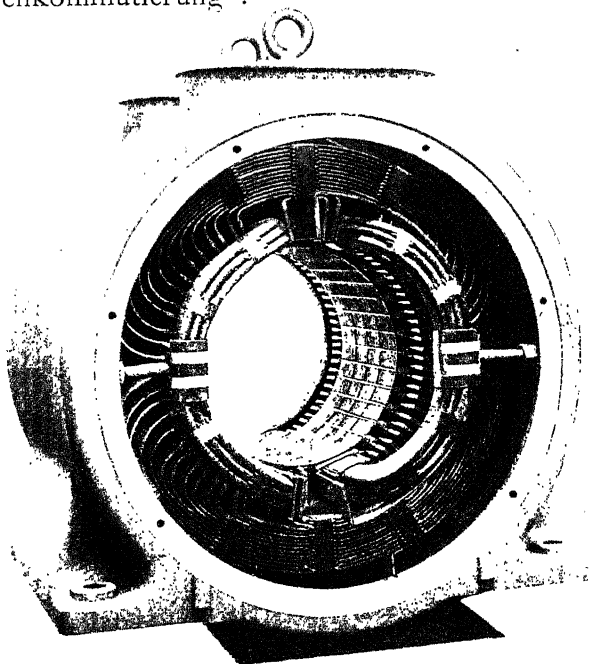



Fig. 113. Brown, Boveri & Co. 135 KW, 3500 Touren, 250 Volt.

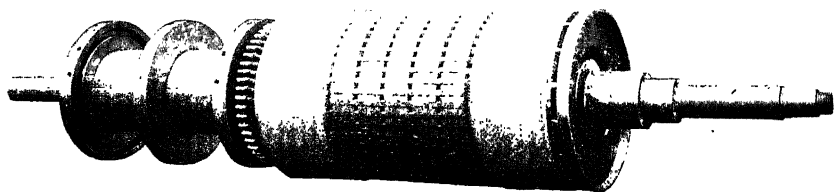



Fig. 114. Brown, Boveri & Co.

Konstruktiv ist die Aussenkommutierung nicht empfehlenswert, die erste Anordnung *(e)* kann ohne weiteres durch dauernden Bürstenvorschub, die zweite durch die gewöhnlichen Hilfspole *(c)* ersetzt werden.

Die Wendepole sind konstruktiv einfacher, leichter und betriebssicherer herzustellen als verteilte Hilfswicklungen nach Fig. 111; auch der Kupferaufwand für die Kompensationswicklung ist wesentlich geringer, besonders wenn die Wendepole nach Fig. 110 ausgeführt werden.

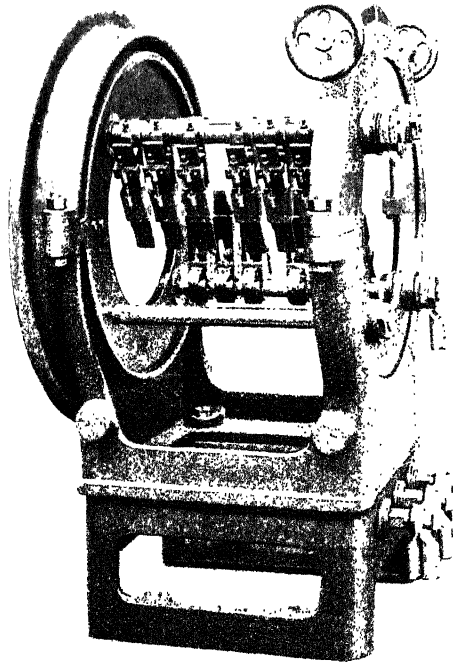



Fig. 115. Brown, Boveri & Co.

Die Hilfspol*dicke* sollte in Richtung des Umfangs nicht kleiner als etwa eine Nutteilung sein; dicke Hilfspole sind aber ungünstig, insofern sie das Magnetfeld der Reaktanzspannung und die Streuung der Hauptpole stark vergrössern, so dass die nützliche Wirkung illusorisch werden kann. Die Hilfspole benötigen etwa 70—100 % soviel Kupfer wie der Anker; sie bedingen eine Erhöhung der Verluste um 15—30 % der

ohm'schen Gesamtverluste im Anker, dagegen wird der Kupferaufwand und der Verlust in der Hauptfelderregung geringer.

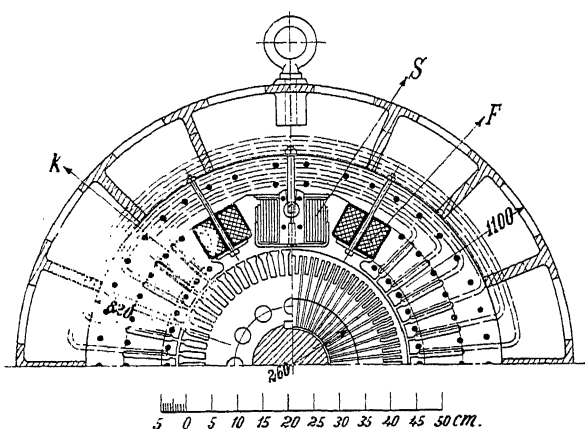



Fig. 116.

Mechanisch zu schwache Hilfspole können durch die periodisch schwankenden magnetischen Zugkräfte in Vibration versetzt werden.

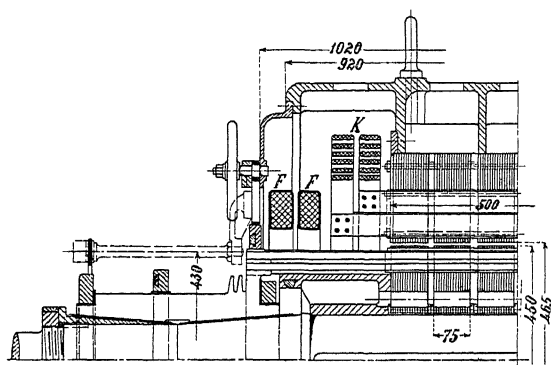



Fig. 116a.

In allen Fällen bestimmt sich die erforderliche Induktion B_x des Hilfsfeldes aus folgender Beziehung

$$B_x \, l \, v \, Z_k \cdot 10^{-8} = e_r \qquad (36\,a)$$

(l = axiale Länge des Hilfspoles, v = Umfangsgeschwindigkeit des Ankers, Z_k = Leiter der kurzgeschlossenen Spule, e_r = Reak-

tanzspannung einer kurzgeschlossenen Spule, Masse in cm). Es ist dabei zu beachten, dass die Reaktanzspannung durch den Hilfspol selbst erhöht wird, d. h. c_1 in Formel (36) grösser wie gewöhnlich; in erster Annäherung kann man annehmen, dass der Hilfspol e_r verdoppelt; siehe E. T. Z. 1905, S. 510.

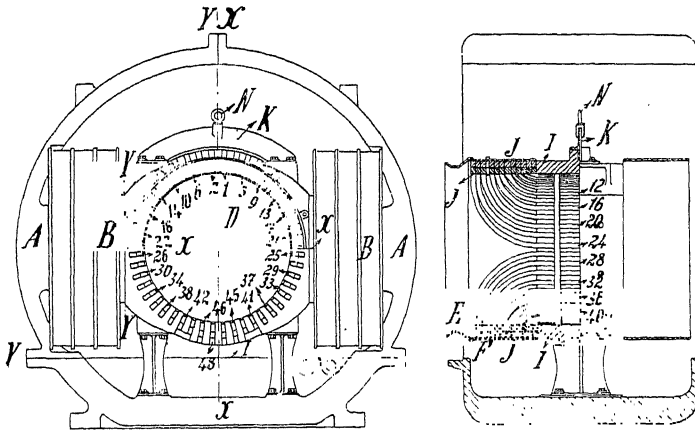



Fig. 118.

Die Amperewindungszahl der Hilfswicklungen auf den Wendepolen und der Ryan oder Déri'schen Kompensationsanordnung muss sein $AW_h = AW_x + AW_a$, AW_a sind die Anker-AW pro Pol, AW_x erzeugen die Induktion B_x am Wendepol oder am Kommutierungszahn: $AW_x = 0{,}8\ B_x\ \delta + AW_e$ (für die Eisenwege) $= \backsim B_x\ \delta$, sofern δ der Luftspalt am Hilfspol oder Hilfszahn ist. Meist gilt angenähert $AW_h = 1{,}3\ AW_a$. Die Breite des Kommutierungszahnes oder -poles in Richtung des Umfangs entspreche etwa der doppelten Bürstendicke auf gleichen Umfang reduziert. Die axiale Eisenlänge l ist häufig gleich der Ankereisenlänge, kann aber auch beliebig kleiner sein (Fig. 109 und 110). Bei Verwendung von Hilfspolen ist der Polbogen der Hauptpole kleiner als gewöhnlich

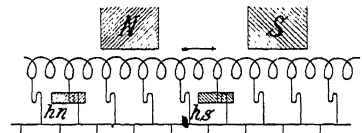



Fig. 119.

zu halten, da sich sonst störende Streufelder einstellen, man macht etwa $P/\tau = 0{,}65$ bis $0{,}5$. Die Befestigung der Wendepole soll derart sein, dass sie im Prüffeld leicht radial und in Richtung des Umfangs justiert werden können, zweckmässig lässt man sie etwas schräg zur Ankerachse verlaufen (Abb. 119b*). Die Hilfserregerwicklung ist so reichlich zu wählen, dass sie durch einen Nebenschlusswiderstand einjustiert werden kann. Maschinen mit Kommutierungspolen und -zähnen sind bezüglich Bürstenstellung sehr empfindlich d. h. die funkenfreie Zone ist sehr klein, sie hängt von der Breite des Hilfspoles ab.

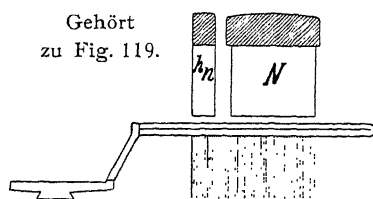



Fig. 119a.

Da die Wendepole den magnetischen Widerstand des Ankerquerfeldes verringern, spart die österreichische Union nach dem ö. Patent 17937 Schlitze**) (Fig. 120) in denselben aus.

Auch die Reaktanzspannung der kurz geschlossenen Spulen wird durch den Eisenrückschluss der Hilfspole erheblich erhöht, die Schlitze Fig. 120 und namentlich die axial kurzen Pole Fig. 110 sind in dieser Hinsicht sehr vorteilhaft, da dadurch der magnetische Widerstand beträchtlich steigt.

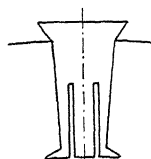



Fig. 119b.

Fig. 120.

Die Induktion im Hilfspol soll bei Vollast kleiner als 10000 und im Joch, das meist das Hauptjoch ist, auch nicht grösser als 10000 sein. In D. R. P. 149 242 geben Siemens & Halske den Hilfspolen h ein

*) Es ist dies ein doppelter, hufeisenförmiger Hilfspol, d. h. zwischen je zwei Hauptpolen liegt ein Nord- und ein Süd-Hilfspol mit in sich geschlossenem magnetischem Kreis. Die AW auf einem solchen Doppelpol brauchen nicht die AW_a zu überwinden, d. h. pro Doppelpol ist $AW_h = 1{,}6\ B_x\ \delta + AW_e = \sim 2\ B_x\ \delta$.

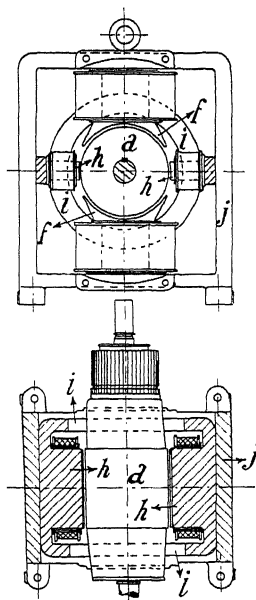
**) Durch Blätterung der gewöhnlichen Hilfspole erreicht man eine ähnliche Wirkung, viel ist von dieser Unterteilung in der Achsrichtung nicht zu halten.

eigenes Joch i, Fig. 121, damit Hilfsfeld und Hauptstrom möglichst proportional bleiben.

Die kleineren Gleichstrom-Turbodynamos bis etwa 20 KW werden meist ohne jegliche Hilfsvorrichtung mit Kohlenbürsten ausgeführt; die General Electric Co. hat auch noch eine 500 KW Maschine für 500 Volt, 1800 Touren vierpolig und mit Kohlenbürsten in ganz gewöhnlicher Weise ausgeführt, Fig. 122. Die meisten Firmen haben sich indessen entschlossen, grössere Gleichstrom-Turbomaschinen entweder mit Wendepolen oder mit einer Kompensationswicklung nach Ryan oder Déri auszuführen.

Fig. 121.

Parsons hat eine Gleichstromturbodynamo für 900 KW (u = 1000 Touren) mit glattem Anker ohne jegliche Hilfsvorrichtung ausgeführt: Ankerdurchmesser aussen d = 1420 mm, achsiale Eisenlänge l = 305 mm, Umfangsgeschwindigkeit = 75 m/Sek., Grössenkonstante KW : d^2 l u = 1,6, Bürstenverstellung erforderlich.

Kompensierte Gleichstromdynamos (mit Wendepolen oder Déri-Wicklung) haben bei Parallelbetrieb eine Tendenz zum Pendeln und damit auch etwas zum Feuern. Im Interesse eines ruhigen Ganges ist es, Fremderregung, z. B. eine direkt gekuppelte Erregermaschine oder eine Batterie zu verwenden (Fig. 117 von Brown, Boveri & Cie., sowie das Schema Fig. 122a), oder mindestens die Erregung von den Sammelschienen, nicht von den Ankerklemmen abzunehmen; in kritischen Fällen legt man vor jede Maschine eine Drosselspule, Fig. 123. Besonders schwierig wird das Parallelschalten von Generatoren, die durch die Kompensationswicklung überkompoundiert sind. In jedem

Falle empfiehlt sich eine Ausgleichsleitung zwischen den Verbindungspunkten von Kompensationswicklung c und Anker A für parallel arbeitende Maschinen (Fig. 123).

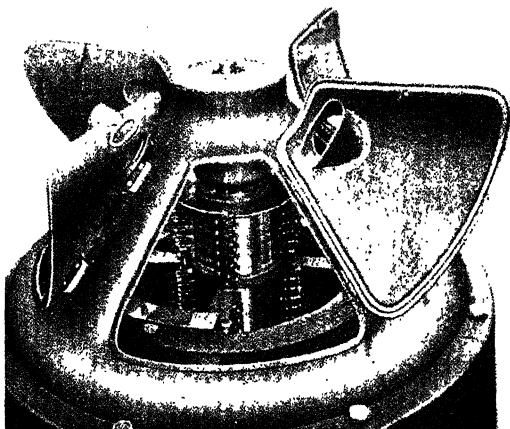



Fig. 122. General Electric Co.

Es gibt. Fälle, wo z. B. zur nachträglichen Anbringung der Wendepole kein Platz vorhanden ist; dann kann man sich nach D. R. P. 155 284 (Lahmeyer-Frankfurt) dadurch helfen, dass man die Wendepole ausserhalb des Feldgestells, z. B. am Bürstenhalterjoch montiert und nur die Polschuhe auf die Wicklung hineinragen lässt, Fig. 123a.

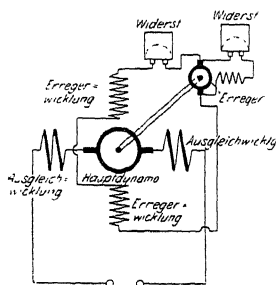



Fig. 122 a.

Der Kommutationszahn, Fig. 124, öster. Patent 19522 der Union E. G. ist samt den Kompensationsspulen leicht ersetzbar.

Nach Fig. 125 D. R. P. 157 935 erregt Lahmeyer-Frankfurt die Hilfspole H direkt von der zugehörigen Bürstenspindel b aus, so dass die Erregung der Hilfspole proportional dem Strom im zugehörigen Ankerzweig ist, was für Schleifenwicklung wichtig ist. Für Motorgeneratoren, die geringe Spannung er-

zeugen, erregt Lahmeyer-Frankfurt die Niederspannungs-Hilfspole, Fig. 126, aus wickeltechnischen Gründen von der Hochspannungs-Motorseite (D. R. P. 157 527).

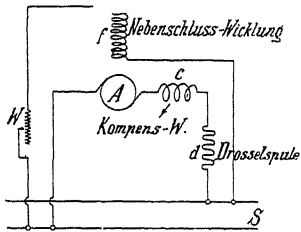
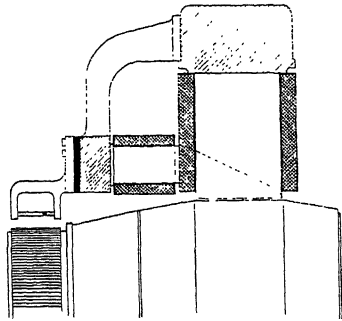



Fig. 123. Fig. 123a.

Dr. Lehmann konstatiert im D. R. P. Nr. 160 392, dass das richtige Wendefeld für die einzelnen kurzgeschlossenen Spulen wesentlich verschiedene Werte haben muss; es muss für die mittleren Spulen grösser sein als für die äusseren und

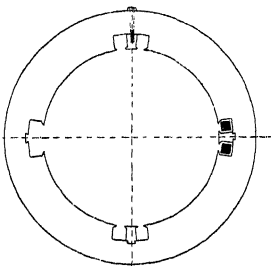
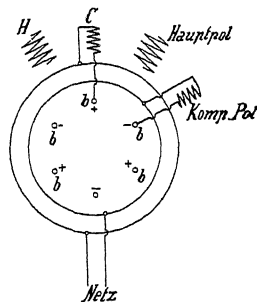



Fig. 124. Fig. 125.

für die austretenden Windungen grösser als für die eintretenden. Ferner wird ein gewöhnlicher Hilfspol ein stark fluktuierendes Feld zeigen, weil er alternierend einem Ankerzahn und einer Ankernut gegenübersteht, was eine beträchtliche Änderung des magnetischen Widerstandes bedingt. Lehmann bildet aus diesen zwei Gründen den Hilfspol folgendermassen

aus*): Der Hilfspol besteht aus einer Reihe radial verstellbarer Lamellen, deren Gesamtdicke der Bürstendicke auf dem Kommutator entspricht; ausserdem ist der Hilfspol gegen die Ankerleiter um eine Nutteilung schräg gestellt. Mittelst dieses Poles kann man die Grösse und den Verlauf der Kommutierungsspannung beliebig justieren. Der Hilfspol ist ausserdem achsial wesentlich kürzer gehalten als der Anker, was unter anderem eine Kupferersparnis bedeutet. Für Ankerwicklungen mit stark verkürztem Schritte liegen die kurzgeschlossenen Stäbe nicht mehr in der geometrischen neutralen Zone, sondern links und rechts davon, deshalb gibt Lehmann dem Hilfspol in diesem Falle zwei vorspringende Polansätze, die eine Lücke zwischen sich lassen; der Pol rechts liegt wohl in der neutralen Zone, die gegenüber dem Anker liegenden Polansätze sind jedoch links und rechts davon angeordnet.

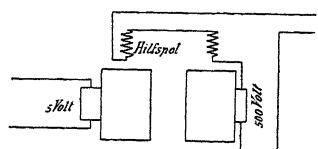
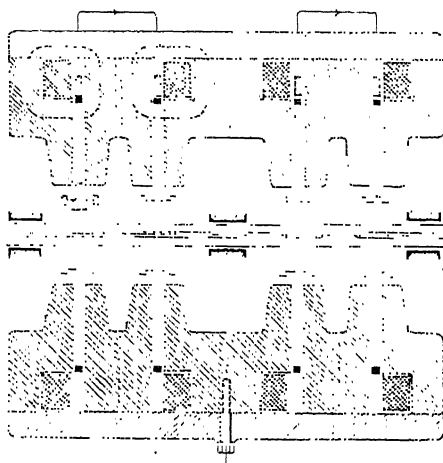



Fig. 126.

Fig. 127.

Die ganze Kommutierungsschwierigkeit lässt sich durch Verwendung der *Unipolarmaschine* (homopolare, acyclische Maschine, Fig. 127—131) umgehen. Im einfachsten Falle besteht sie aus einem Metallzylinder (axiale Type, Fig. 128), oder einer Metallscheibe (radiale Type, Fig. 127), die in einem konstanten Magnetfeld rotieren. Die erzeugte EMK ist

$$E = B. l. v. 10^{-8} \text{ in Volt}$$

*) Z. f. E. Wien 1905, S. 499.

B = mittlere Induktion, v = mittlere Rotationsgeschwindigkeit, l = Länge des Zylinders oder radiale Ausdehnung der Scheibe, soweit sie vom Magnetfeld durchsetzt werden; alle Masse in cm. Für Scheiben vom äusseren Durchmesser d kann man $l = \frac{3}{8} d$ und $v = \pi \frac{0{,}525\, d}{60} u$ setzen, woraus für B = 15000 folgt, $E = 3{,}1\, d^2 u \cdot 10^{-6}$. Selbst für die extremen Werte B = 15000, v = 10000 cm und l = 50 cm ergibt sich in der einfachen Maschine erst E = 75 Volt. Die Stromstärke ist dagegen bei genügend grossem Querschnitt beliebig. Der Strom wird durch Bürsten, die an beiden Enden des Zylinders oder innen und aussen an der Scheibe schleifen, abgenommen. Obwohl die Stromabnahme in diesem Falle so einfach ist, wie bei Schleifringen, dürfte doch bei mehr als 50 bis 60 m/Sek. Funkenbildung zu erwarten sein. Seidener schlägt deshalb vor, die Bürsten nach Fig. 129 seitlich schleifen zu lassen, wobei die Gefahr des Abschleuderns verringert würde. Zugleich sind in dieser Skizze zwei Scheiben hintereinander geschaltet, wodurch die Spannung verdoppelt wird; die Naben beider Scheiben sind durch die Welle leitend verbunden. Diese Hintereinanderschaltung mehrerer Scheiben oder Zylinder, Fig. 128, bezw. auch mehrerer Zylinderstreifen, Fig. 130, Scheibensegmente, Fig. 131, liefert die Möglichkeit der Erzeugung höherer Gleichspannungen. Allerdings werden dann eine grosse Anzahl Bürstensätze erforderlich, die

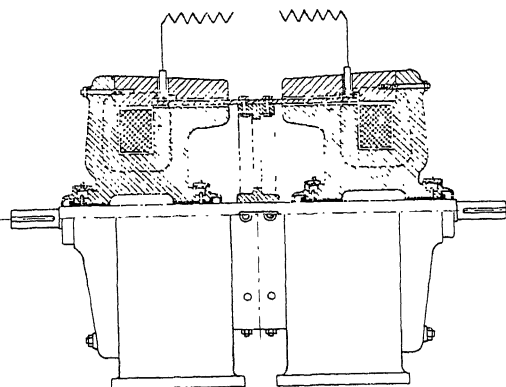



Fig. 128.

den Wirkungsgrad herabdrücken. Ein weiterer Nachteil der Unipolarmaschine ist die grosse Ankerrückwirkung und der dadurch bedingte Spannungsabfall, sowie die dadurch erzeugten Wirbelstrom- und Hysteresisverluste. Die Ankerrückwirkung muss deshalb z. B. durch eine vom Hauptstrom erregte Kompensationswicklung aufgehoben werden. Zur Ermöglichung hoher Umfangsgeschwindigkeiten sollte man den rotierenden Teil aus Stahl oder Bronze herstellen. Auch in D. R. P. 126 307 ist eine Unipolarmaschine für Turbinenbetrieb angegeben, dabei ist eine mehrteilige Trommel

Fig. 129.

angewendet. Hat man Z Scheiben oder Segmente oder Streifen oder Leiter in Serie, so wird $E = Z \cdot Bl\, v \cdot 10^{-8} = 1{,}66\, K\, Z\, u \cdot 10^{-10}$, K = totaler Flux, u = Umdrehungen per Minute.

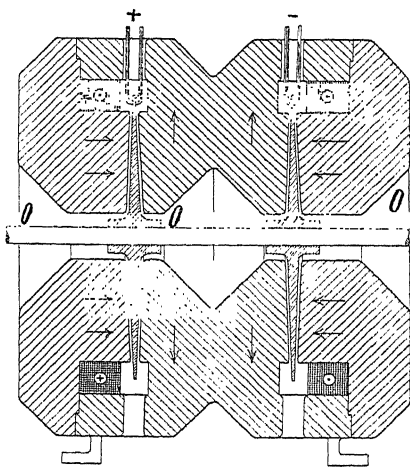
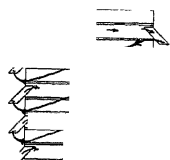
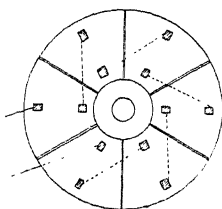
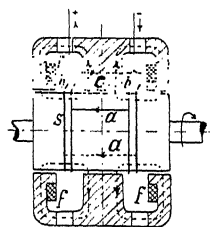



Fig. 130. Fig. 131. Fig. 132.

In neuerer Zeit hat die General Electric Co. nach Entwürfen von Noeggerath*) eine kompensierte Unipolarmaschine für 300 KW, 3000 Touren und 500 Volt gebaut. Sie besteht, Fig. 132—134, aus einem Feldgehäuse aus Stahlguss mit zwei

*) Proc. Am. Inst. El. Eng. 1905, Januar, ferner E. P. 15118 (Jahr 1904).

koachsialen Feldwicklungen f und einer zylindrischen Armatur aus Stahlguss, welche eine geringe Anzahl von hintereinander geschalteten Leitern a an der Mantelfläche trägt, die an den beiden Enden durch Schleifringe s verbunden sind. Die Leiter a sind durch im Gehäuse liegende Leiter c miteinander verbunden. Durch 8 Löcher im Feldgehäuse gelangt man je zu 3 Bürsten. Die angeführte Maschine hat nicht nur 2, wie gezeichnet, sondern

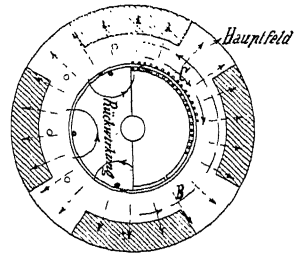



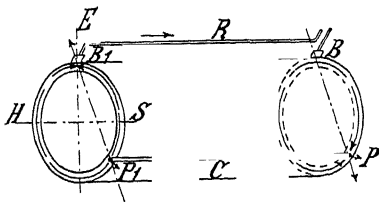
Fig. 133.

12 Leiter a, 12 Leiter c und 2×12 (statt 2×2) Schleifringe s aus Gusstahl. Der Stromlauf durch einen Leiter C, 2 Schleifringe und eine Rückleitung R zeigt für sich Fig. 134. Es treten nun 2 Ankerreaktionen auf: 1. die Ringreaktion, Fig. 134; 2. die Reaktion Fig. 133 der axialen Leiter; beide erzeugen Wirbelstromverluste und einen Spannungsabfall; die Ringreaktion entspricht den üblichen Gegen-AW, die zweite Reaktion den Quer-AW.

Fig. 134.

Der Strom in den Ringsegmenten $B_1 S P_1$ und $B_1 H P_1$ wechselt fortwährend mit der variablen Entfernung der Bürste B_1 von P_1, da der Strom sich in P_1 in 2 Ringströme entsprechend dem variablen Widerstand der Segmente verzweigt. Diese Ringreaktion lässt sich praktisch dadurch kompensieren, dass man die Bürsten der aufeinanderfolgenden Ringe spiralförmig gegeneinander versetzt und zwar im entgegengesetzten Sinne wie die Anschlüsse der Leiter a, Fig. 132. Die Bürsten des 1., 5., 9. Rings mögen in der Ebene 0 Grad liegen, die der Ringe 2, 6 und 10 in der Ebene 90 Grad,

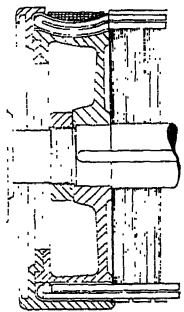



Fig. 135.

die der Ringe 3, 7 und 11 in der Ebene 180 Grad, und die der Ringe, 4, 8 und 12 in der Ebene 270 Grad. In diesem Falle neutralisieren sich die Ringreaktionen. Zur Überwindung der axialen Reaktion verwende man flache, dicht zusammengelegte Anker- und Gehäuseleiter a und c. Benachbarte Ringe und Leiter sind so zu montieren, dass die geringste Spannung dazwischen auftritt. Durch Verschiebung der Bürsten oder durch eine geeignete Winkelverschiebung der Anker- oder Gehäuseleiter gegenüber den Anschlusskontakten kann diese Maschine über- oder unterkompoundiert werden. Sie ist selbsterregend und kann z. B. als Serienmaschine ohne Erregerspulen ausgeführt werden. Die Hauptverluste rühren von den Bürsten her, die ohmschen Verluste im Rotorkupfer sind verschwindend. Der Wirkungsgrad der zitierten Dynamo ist bei 300 KW 90 %, bei 150 KW 88 %, bei 450 KW 92 %, ohne Lager- und Luftreibung. Die 24 flachen Ankerleiter von etwa 350 mm axialer Länge sind nach dem Zylinderradius gebogen und auf der glatten Ankeroberfläche mittelst Stahlbandagen gehalten; zur Aufnahme der Umfangskräfte sind Treibhörner in den massiven Ankerzylinder aus Stahl, Fig. 133, eingelassen. Es ist also kein lamellierter Ankerkörper wie bei gewöhnlichen Gleichstromdynamos erforderlich. Wegen der Ankerreaktion wurden die Leiter nicht in Nuten gebettet. Der Luftspalt wird bei den verschiedenen Typen zu 1,5 bis 12 mm angegeben.

MECHANISCHER AUFBAU DER GLEICHSTROM-TURBODYNAMOS.

Die maschinengewickelten Ankerspulen von gewöhnlichen Gleichstrom-Turbodynamos werden in den offenen Nuten mit 5—10 mm starken Metallkeilen (Bronze, Aluminium), seltener durch Bandagen, wobei Fiberkeile verwendet werden, festge-

halten; bei Stabwicklung verwendet man wohl auch nahezu geschlossene Nuten und schiebt die Stäbe von der Seite ein. Die als Fasswicklung ausgebildeten Stirnverbindungen liegen nach innen auf einem mit Ventilationsflügeln ausgerüsteten Flansch, Fig. 117 und werden auf diesem unter Zwischenlegung geeigneter Isolationszylinder durch Bandagen oder Metallzylinder (Bronze, Aluminium, Nickelstahl) festgepresst, Fig. 135, siehe

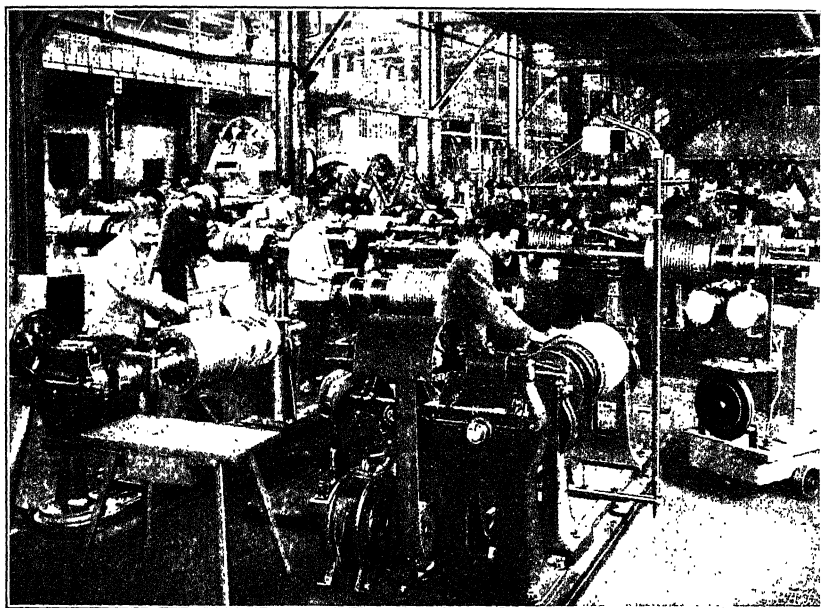



Fig. 135 a. Ankerwickelei der A. E. G. Berlin.

auch die Ankerwickelei der A. E. G. Berlin, Fig. 135 a. Eine schwierige Aufgabe ist es, das Arbeiten und Durchscheuern dieser Isolation der Stirnverbindungen zu vermeiden. Die Stirnverbindungen des Ankers Fig. 135 b der Siemens-Schuckert-Werke für 170 KW, 3000 Touren und 220 Volt sind durch Bronzezylinder festgehalten.

Die Bandagen sind in einzelne 20--30 mm breite Streifen zu unterteilen und mit einem Glimmerring zu unterlegen; auf

den Stirnverbindungen verwendet man Stahl-(Piano)-Draht von 1,5 mm Durchmesser, auf Eisenlänge Durana- oder Bronzedraht von 1,5 mm Durchmesser. Das Material von Bandagendrähten ist zuverlässiger als das massiver Metallkappen, die möglichst aus gewalztem Material bestehen sollten. Überdies sollten sie konisch anlaufen, so dass sie stetig auf die Wicklung aufgepresst werden können. Selbst bei Verwendung von Kappen empfiehlt es sich, auf die Wicklung erst einen Isolationszylinder und dann eine Bandage, z. B. von Vierkantdraht, zu legen,

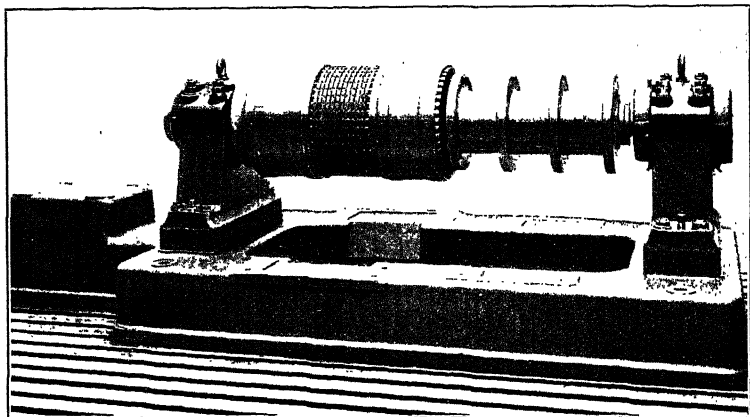



Fig. 135 b. Siemens-Schuckert-Werke.

über die erst der Metallzylinder geschoben wird. Um die Fliehkräfte auf die Stirnverbindungen zu verringern, hat sie die öster. Union nach Fig. 135 c abgekröpft. — Die Kommutatorsegmente der Turbodynamos werden fast allgemein durch zwei oder mehr Schrumpfringe, die durch 2 mm starke Glimmerringe isoliert werden, auf einem mit konischen Flächen versehenen Körper festgepresst, Fig. 117. Andere Methoden der Befestigung von raschlaufenden Kommutatoren sind aus Fig. 145, 135d (Oerlikon) und 107 ersichtlich. Die Bürstenbrille muss mechanisch so stabil wie möglich ausgeführt werden, die langen Bürstenstifte sind an ihrem freien Ende durch einen kräftigen

Ring zu halten, Fig. 115. Der Bürstenhalter muss sehr elastisch und fein justierbar sein und darf nicht vom Kommutator abspringen.*) Meist werden Metallbürsten und zwar aus Messinglaub oder Draht oder Gauze verwendet, nur wenige Firmen haben es mit Kohlenbürsten oder Kupfer-Kohlenbürsten, Fig. 104a von Schuckert, versucht. Die Metallbürsten nützen sich allerdings sehr rasch ab, eine Messingdrahtbürste von 1 kg. war z. B. auf einer Parsonsdynamo in 336 Stunden aufgebraucht. Um Wirbelströme in den Lamellen des Kommutators zu vermeiden, versieht sie Brown, Boveri & Cie. mit langen Schlitzen, Fig. 117.

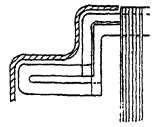
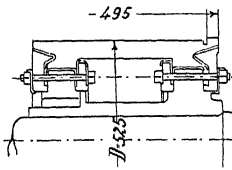



Fig. 135 c.

Fig. 135 d.

Um die Bürstenauflage auf dem Kommutator zu verbessern, hat Parsons denselben mit zahlreichen Rillen versehen, auch Lahmeyer-Frankfurt hat nach Fig. 136 die Bürsten in schwalbenschwanzförmige Rillen gesetzt und sie derart der Einwirkung der Fliehkraft entzogen. Noch empfehlenswerter dürfte es sein, die Kommutatorlauffläche als Ebene senkrecht zur Achse auszubilden und die Bürsten seitlich aufzupressen, da dann für den Anpressungsdruck die Fliehkraft ausser Frage bleibt. Ein ähnlicher Kommutator ist in E. P. 17527 vom Jahre 1904 angegeben (Abb. 137).

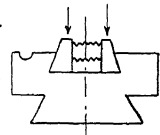
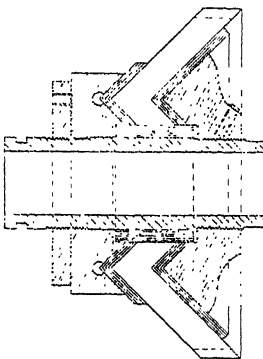



Fig. 136.

Fig. 137.

Damit die Bürsten keine Rillen in die Lauffläche einfressen, gebe man dem Anker ein *Wellen*spiel, das ihn periodisch axial hin- und her bewegt.

*) Electrician 3. Nov. 1905. Kohlenbürsten durch Druckluft angepresst.

Die äussersten Umfangsgeschwindigkeit liegen für den Anker zwischen 50 und 90 m/Sek., für den Kommutator zwischen 20 und 50 m/Sek. *)

Die Ermittlung der mechanischen Beanspruchung der Gleichstromanker geschieht nach den für Drehstromdynamos gegebenen Formeln, Seite 50 ff. Zunächst handelt es sich um die Zugbeanspruchung in dem Blechpaketring des Ankers nach Formel 1 bis 3. Die Beanspruchung der Zähne in ihrer Wurzel gibt Formel 22 und der Nutkeile Formel 24. Die Zugbeanspruchung in den Bandagen oder Kappen auf den Stirnverbindungen berechnet man aus Formel 25. Es erübrigt noch die mechanische Berechnung des Kommutators. Jedes Kommutatorsegment vom Gewicht G_e, soweit es zwischen zwei Schrumpfringen liegt, wird mit σ_b kg/c² auf Biegung beansprucht:

$$\sigma_b = \frac{0{,}00112\, G_e R_e u^2 \cdot 1{,}2 \cdot \frac{a}{8}}{{}^1/_6\, s\, h^2} \tag{37}$$

R_e = Schwerpunktradius des Segments in m, a = Abstand der beiden Schrumpfringe in cm, s = mittlere Segmentstärke in cm, h = Segmenthöhe in cm. Man kann auch schreiben:

$$\sigma_b = 9 \cdot 10^{-6} \frac{R_e u^2 a^2}{h} \tag{38}$$

Fasst man die Segmente als eingespannten Balken auf, so ist in (37) $\frac{a}{8}$ durch $\frac{a}{12}$ zu ersetzen. Da durch wiederholtes Abdrehen h stark reduziert wird, wodurch σ_b steigt, so tritt die Gefahr ein, dass die Segmente sich ausbauchen; man sehe deshalb eine Marke vor, bis zur welcher abgedreht werden kann.

Die Schrumpfringe, welche die Kommutatorsegmente zusammenhalten, werden durch die Fliehkraft ihres Eigengewichtes

*) Eine Dynamo der Maschinenfabrik Oerlikon für 150 KW 3000 Touren, die durch einen kräftigen Ventilator gekühlt wird, hat 43 m/Sek. Kommutatorgeschwindigkeit.

G_s und diejenige des Gewichtes $G_e \cdot k$ sämtlicher Lamellen auf Zug beansprucht.

$$\sigma_z = \frac{0{,}00112 \, (G_s R_s + k \, G_e R_e) \, u^2 \cdot 1{,}21}{m \cdot 2 \pi \, q_s} \qquad (39)$$

R_s = Schwerpunktradius der Schrumpfringe, k = Lamellenzahl, G_e = Gewicht einer Lamelle, R_e = Schwerpunktradius der Segmente, q_s = Querschnitt jedes der m Schrumpfringe.

Die Schrumpfringe sind nun so aufzuziehen, dass bei Ruhe diese Spannung herrscht, damit der Kommutator bei Lauf nicht locker wird.

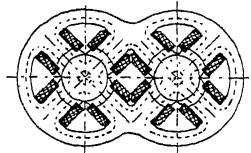



Fig. 138.

Grössere Lavalturbinen werden mit zwei in verkehrtem Sinne rotierenden Dynamos gekuppelt (siehe „Dampfturbinen“, Fig. 36). Die Joche der beiden Maschinen

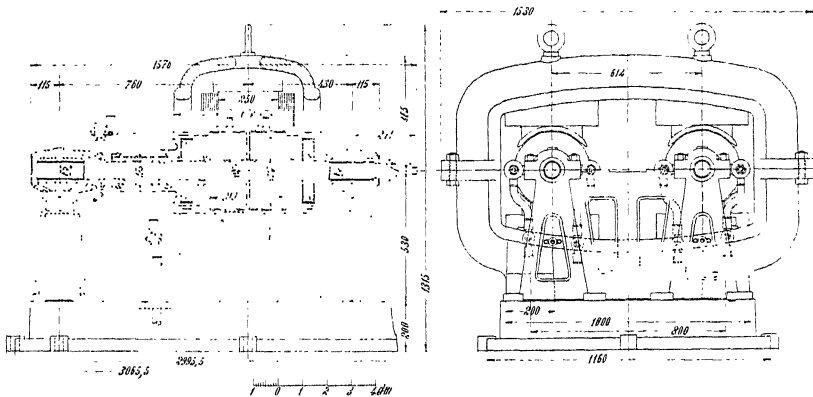



Fig. 138 a. Deutsche Elektrizitätswerke Aachen.
100 PS, 750 Touren.

vereinigt man zweckmässig nach Fig. 138 (D. R. P. 143 121), da man dadurch an Platz und Material spart.*) Die Doppeldynamo Fig. 138 a der Deutschen Elektrizitätswerke Aachen ist für 100 PS bei 750 Touren normiert.

*) Eine zweipolige Lavaldynamo, siehe Niethammer, Elektrische Maschinen und Anlagen Bd. I, Abb. 614.

ELEKTRISCHER ENTWURF VON GLEICHSTROM-DYNAMOS.

Die Gleichstromturbodynamos für Leistungen unter 100 bis 200 KW werden meist zweipolig gebaut, bis gegen 1000 KW vierpolig*), darüber sechspolig. Die Periodenzahl wird dabei je zwischen 40 und 100 liegen. Kleine Gleichstromturbodynamos bis etwa 200 KW werden öfters nur für 60 :- 125 Volt gebaut, grössere von 100 bis 1000 KW nur für 250 bis 500 Volt, siehe Niethammer, Dampfturbinen, S. 69.

Die Grössenkonstante $C = \frac{KW}{d^2 l u}$ der Gleichstromturbodynamos ist kleiner als die üblicher Maschinen, etwa 1 bis 2 von 100 KW aufwärts. Ebenso sind die Amperestabzahl AS pro cm Umfang und die Luftinduktion B_l mässig anzunehmen, $AS = \infty 100$ bis 150 und $B_l = 5000$ bis 7000 bei grösseren Einheiten.

Die Nuten sind so seicht als möglich, d. h. nur $15 \div 25$ mm tief zu machen. Auch bei kompensierten Typen gehe man mit der Lamellenzahl so hoch als irgendwie möglich, die Nutenzahl mache man gleich der Lamellenzahl oder höchstens gleich der Hälfte, nicht kleiner. Die Induktion im Ankereisen hängt von der Periodenzahl und Kühlung ab, sie liegt etwa zwischen 4000 und 8000, in den Zähnen, wenn sie niedrig sind, zwischen 15 000 und 20 000. Bei nichtkompensierten Maschinen sollte das Verhältnis AW für Luft und Zähne zu AW_a unter dem Polbogen**) > 2 sein. Der Luftspalt δ fällt bei hochtourigen Maschinen ziemlich gross aus, 5 bis 20 mm bei Typen über 100 KW; auch bei kompensierten Typen mache man δ nicht

*) Eine neuere Gleichstrom-Turbodynamo für 300 KW, 3000 Touren ist vierpolig

**) AW_a = Anker-AW pro Pol.

kleiner, wenn dies auch theoretisch anginge. Die Stromdichte im Anker ist etwa 2,5 :- 3,5 Amp./qmm, im Feld einschliesslich Kompensationswicklung 1,0 bis 1,5 Amp./qmm.

Die Berechnung der Reaktanzspannung e_r (S. 70) gibt stets das Mittel an die Hand zu entscheiden, ob eine Maschine ohne Kompensationswicklung gebaut werden kann oder nicht. Wird selbst bei Verwendung von Ankerumfangsgeschwindigkeiten von 50 :- 60 m/Sek. und von Kommutatorgeschwindigkeiten von 20 :- 30 m/Sek. $e_r > 4$ bis 5 Volt, so sind Hilfspole oder Hilfswicklungen zu verwenden.

Wählt man die AW der Kompensationswicklung $> AW_a + AW_x$ (S. 81) oder schiebt man die Bürsten kompensierter Dynamos nach rückwärts, so erhält man eine *kompoundierte* oder überkompoundierte Maschine, deren Spannung mit der Belastung etwas wächst. Den Strom in der Kom-

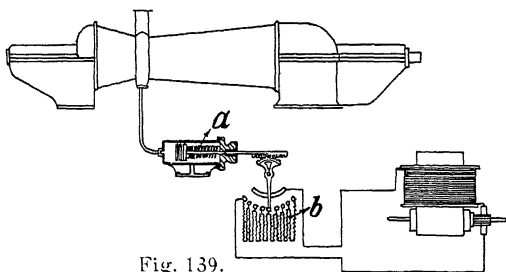



Fig. 139.

pensationswicklung muss man durch einen parallelen Widerstand entsprechend der Bürstenstellung regeln können. Natürlich kann eine Turbodynamo auch durch eine Serienwicklung auf den Feldpolen kompoundiert werden. Statt der Kompoundierung kann man auch selbsttätig wirkende Feldregler vorsehen, die z. B. durch den Dampfdruck (Fig. 139) entsprechend der Belastung verstellt werden (D. R. P. 136 689 von Brown, Boveri & Cie.), diese Vorrichtung kann gleichzeitig auch die Bürsten verstellen. Anderseits ist auch eine direkte Beeinflussung der Steuerung der Dampfturbine durch den elektrischen Strom sehr angezeigt. Ein Relais, das von der Klemmenspannung oder dem Hauptstrom beeinflusst wird, schliesst oder öffnet den Stromkreis zu elektrisch betätigten Ventilen, die die Düsen schliessen und öffnen.

BEISPIELE VON GLEICHSTROMDYNAMOS.*)

Die Gleichstromdynamo (Fig. 140) ohne elektrische Hilfsvorrichtung von Lahmeyer-Frankfurt leistet bei 3000 Touren 160 KW 230 Volt. Sie ist vierpolig. Die Bürstenstifte sind in der Mitte gefasst, um die freitragende Länge zu halbieren.

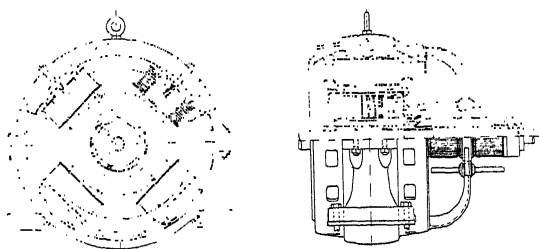



Fig. 140. Lahmeyer-Frankfurt, 160 KW, 3000 Touren.

Der äussere Ankerdurchmesser ist 550 mm, der innere 250 mm, die Eisenlänge 300 mm, der Anker trägt eine Ringwicklung mit 130 Spulen in 130 Nuten von 5,6 × 15,5 mm mit einem

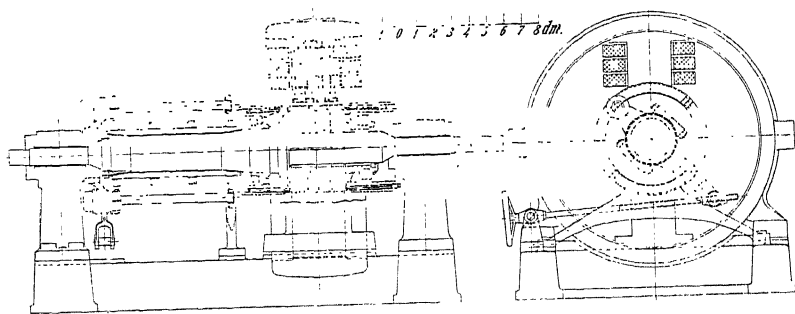



Fig. 141. A. E. G. Berlin, 200 KW, 2000 Touren.

Stab 3,5 × 11 mm. Die Wicklung wird in den Nuten durch Keile, auf den Stirnverbindungen durch Stahlgusskappen gehalten; auch der mit Kanälen versehene Ankerkörper besteht

*) Eine ausführliche elektrische Berechnung einer 900-KW-Turbodynamo ist in Niethammer, Elektrische Maschinen und Anlagen Bd. I, S. 242, gegeben; weitere Gleichstromturbodynamos ebenda Bd. I, Fig. 483 bis 485, 509 bis 512, 708 bis 711.

aus Stahlguss. Der Kommutatordurchmesser ist 230 mm, seine totale Breite 420 mm (310 mm nutzbar). In der Mitte und am Anker ist auf den Kommutator je ein Schrumpfring aufgezogen, aussen besorgt ein Pressring und eine Mutter die Befestigung. Die Zahl der Lamellen ist 130, sie sind durch Ausgleichsdrähte verbunden. Die Stromabnahme geschieht durch vier Spindeln zu sechs Messingbürsten von je 2,4 qcm Querschnitt. Der runde Pol hat einen Durchmesser von 185 mm.
Der kleine zweipolige Turbogenerator Fig. 107 von Lahmeyer-Frankfurt mit Hilfspolen für 30 KW, 5000 Touren, 110 Volt

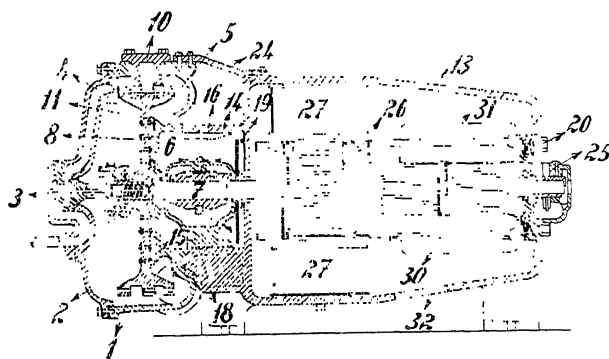



Fig. 142. General Electric Co.

hat einen Ankerdurchmesser aussen = 260 mm, eine Eisenlänge = 100 mm und einen Kommutatordurchmesser = 150 mm; 44 Ankernuten mit 88 Stäben 5×7 mm; 44 Lamellen, die 210 mm breit sind. Der Polquerschnitt ist 108 qcm. Jeder Hilfspol hat 16 Windungen von 3×70 mm Band.

Die Gleichstromdynamo Fig. 141 der A. E.-G. Berlin leistet 200 KW bei 2000 Touren und 230 Volt. Der Ankerdurchmesser aussen beträgt 500 mm, die Eisenlänge 260 mm, der Kommutatordurchmesser ist 280 mm. Die Maschine läuft mit Kupferkohlenbürsten.

Die Figuren 142 und 143 zeigen die konstruktive Durchbildung der kleinen Turbodynamos der General Electric Co. mit

horizontaler Welle und Leistungen von $1^1/_2$ bis 75 KW. Das zweipolige Dynamogehäuse ist ganz abgeschlossen, da diese Typen z. B. für Zugsbeleuchtung direkt auf die Lokomotiven gesetzt werden. Die Ankerwicklung ist in üblicher Weise mittelst Bandagen festgehalten, der Kommutator durch drei Schrumpfringe. Die Lager besitzen Ringschmierung; das fliegende Turbinenrad hat drei Schaufelkränze (Amerikanisches Patent 768593).

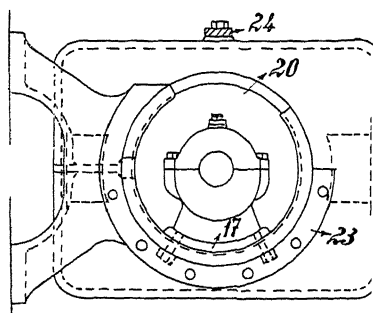



Fig. 143. Zu Fig. 142.

Die Fig. 112 bis 115 veranschaulichen in recht deutlicher Weise die Konstruktion der Turbogleichstromdynamos der A.-G. Brown, Boveri & Cie., die im Bau von Turbodynamos Hervorragendes geleistet hat. Die Gleichstromdynamos werden durchweg mit Déri's Kompensation ausgeführt. Das lamellierte

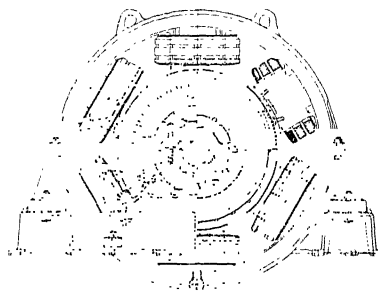
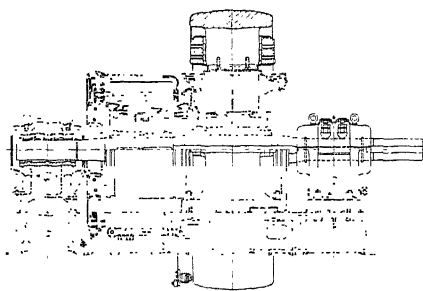



Fig. 144. J. J. Rieter & Co., 640 KW. 500 Touren.

Feld mit den Kommutierungszähnen ist ohne und mit Wicklung dargestellt; der Anker hat Fasswicklung, die in den Nuten durch Bronzekeile und auf den Stirnflächen durch eine fortlaufende Drahtbandage festgehalten wird. Besonders kräftig ist das Bürstenhalterjoch aufgebaut, die Messinglaubbürsten sind elastisch und fein justierbar ausgeführt. Der im Schnitt und

in verschiedenen Ansichten dargestellte Gleichstromturbogenerator Fig. 117 von Brown, Boveri & Cie. leistet 250 KW bei 150 Volt und 2700 Touren; man beachte vor allem die Art der Kühlung, die Kühlluft strömt unten zu und oben ab.

Figur 144 Gleichstromgenerator von 920 PS oder 640 KW, 500 Touren, 700 bis 800 Volt von J. J. Rieter & Cie., Winterthur:

Diameter der Armatur	1140 mm,
Anzahl Nuten	132,
Windungen pro Nut	4,
Leiter pro Armatur	1056,
Leiterdimension	1,7 × 9 mm,
Schaltung	2-fach parallel,
Anzahl Kollektorlamellen . . .	528,
Kollektordiameter	700,
Kollektorlänge	430,
Nebenschlussabteilungen pro Pol .	2,
Windungen pro Abteilung . . .	925,
Drahtdimension	1,8 mm Φ,
Serienwicklung pro Pol	$5^1/_2$,
Querschnitt	460 qmm.

Fig. 145 der Maschinenfabrik Oerlikon, Umformer mit stehender Welle, 560 KW, 333 Touren, 160 Volt.

Die Fig. 145 a veranschaulicht einen Schwungrad-Umformer (Puffermaschine) der Union E. G. für 500 KW, 0 bis 500 Volt Gleichstrom, 300 bis 375 Touren, 50 Per./Sek. und 5800 Volt Drehstrom, $GD^2 = 210000$ kgm² (Schwungrad) und 295000 (total); Lagerdruck $k = 12$ kg/qcm und Zapfengeschwindigkeit $v_z = 4,3$ m/Sek.; die Schwungradlager haben Pressöl- und Wasserkühlung.

Fig. 122 der General Electric Co. N. Y. 500 KW, 1800 Touren, 500 Volt, direkt gekuppelt mit einer stehenden Curtis-

turbine (siehe „Dampfturbinen", Fig. 57), Ankergeschwindigkeit = 60 m/Sek., Kommutatorgeschwindigkeit 25 m/Sek., Kohlenbürsten. Siemens Bros. haben eine 1400 KW-Gleichstromdynamo in direkter Kupplung mit einer Parsonsturbine

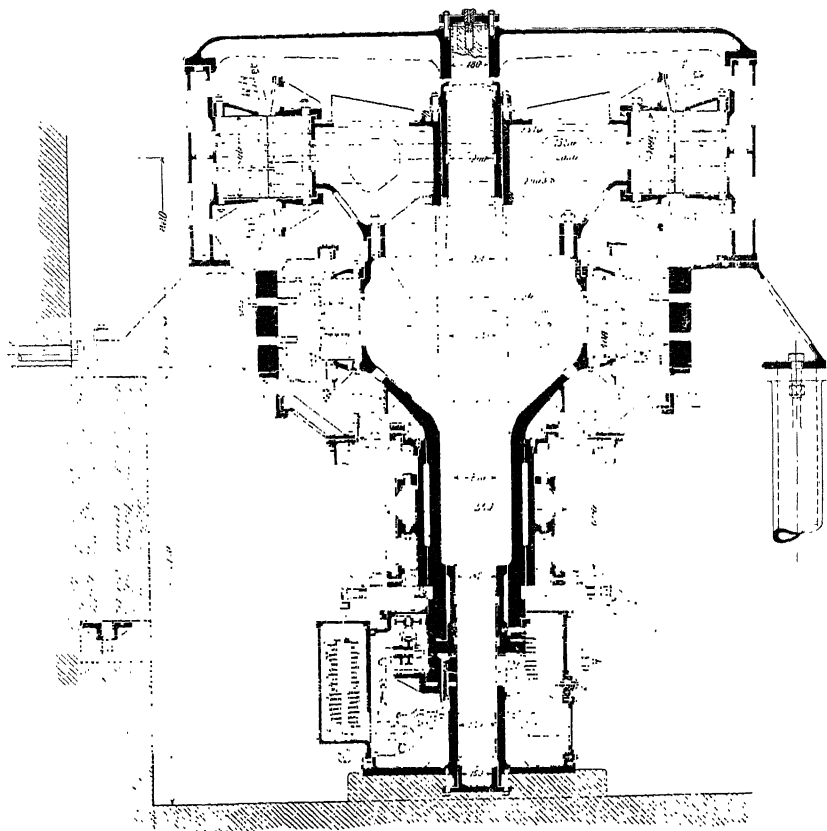



Fig. 145. Maschinenfabrik Oerlikon, 560 KW, 333 Touren.

ebenfalls mit Kohlenbürsten gebaut; die Maschine ist in 2 Tandemdynamos à 700 KW unterteilt.

Fig. 108 der Maschinenfabrik Oerlikon: Gleichstrommotor von 40 PS mit Nebenschlussreglung von 540 bis 1080 Touren, 500 Volt, Anker Φ aussen d = 390 mm, Eisenbreite l = 260, Nutzahl = 51, Nutmasse 10,5 × 28 mm, einfache Wellen-

wicklung, Leiterzahl Z = 612, Lamellen k = 153, 2 Bürstenstifte mit Kohlen 12×25 mm, Luftspalt δ = 3 mm, jeder Hilfspol hat 68 Windungen von 7 mm Draht.

Fig. 146 Turbodynamo für Scheinwerfer, montiert auf dem Kessel von Dampflokomotiven, der Pyle National Electric Headlight Co. Chicago*): 1000 Watt, 1800 Touren, 15 Amp.,

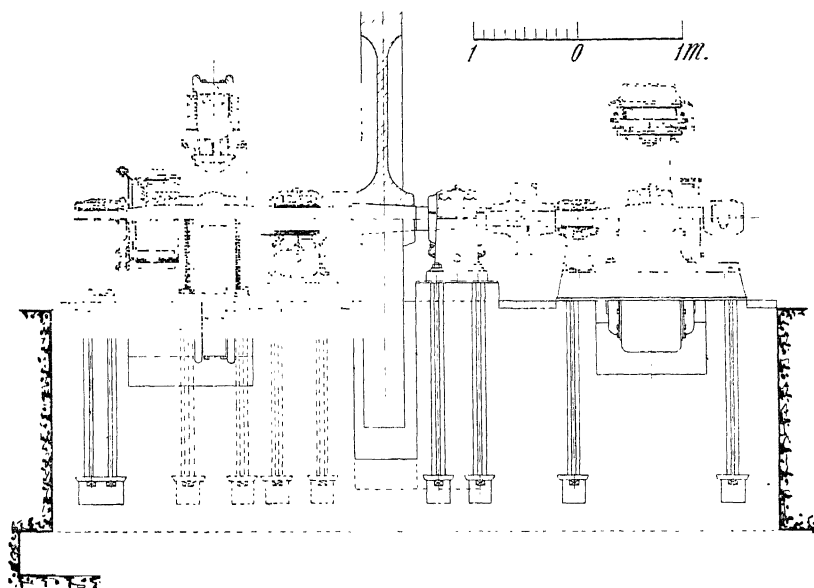



Fig. 145 a. Union E. G., 500 KW. 375 Touren.

65 Volt, G = Gehäuse mit dem Deckel D, R = Laufrad aus Stahlguss mit den Schaufeln S_1 bis S_4, L_1 bis L_3 Leitschaufeln, K = Dampfeinlass durch Düsen, A = Auspuff. Ein Federregler wirkt auf den Bolzen B, der den Dampf drosselt. Die zweipolige Manchesterdynamo hat einen Ringanker von 16 cm Durchmesser, der 8 cm breit ist und 40 Nuten trägt. Die übrigen Erklärungen gibt folgende Tabelle:

*) Siehe Eisenbahntechnische Zeitschrift 1905. J. Schüssler.

1. Maschinengehäuse mit 4 Schaufelkränzen.
2. Rad mit 5 Schaufelkränzen.
2½. „ „ 3 „
3. Gehäusedeckel.
5. Maschinengestell.
6. Schmierdeckel d. Aussenlagers.
6½. „ „ Innenlagers.
7. Polschuhe.
8. Turbinen-Drucklager.
9. Messing-Verbindungsstück für das Magnetgestell.
10. Oberer Bürstenhalter.
11. Unterer „
12. Kommutator.
12½. Ankernabe.
13. Kommutator-Büchse.
14. 14½. } Schutzgehäuse der Dynamo.
15. Kommutator-Mutter.
16. Kommutator-Schlussplatte.
17. Hauptlager.
18. Endlager.
20. Stopfbüchse.
21. Stopfbüchse und Mutter.
22½. Schmierring.
25. Obere Wicklung.
26. Untere „
28. 28½. 29. } Polklemme.
30. Halter für das Reglergewicht.
30½. Halterschraube.
31. Reglergewicht.
32. Verstärktes Auge der Reglerfeder.
33. Gusseis. Zwischenlagscheibe.
34. Verbindungshebel.
35. Reglerbefestigung.
36. Reglerhebel.
37. Reglerlager.
38. Bronzekolbenventil.
39. Graphitring.
41½. Reglerfedern.
42. Regler-Deckelfeder.
45. Ankerschlusschraube.
46. 47. Gehäuseschrauben.
68. Schraube der Polklemme.
97. Isolierende Unterlagscheibe.
97½. Isolation.
105. Dynamofuss.
110. Einstellschr. f. d. Bürstenfed.
111. Verbindungsschraube für die Lichtleitung.
112. Verbindungsschraube für die obere Magnetwicklung.
113. Bürstenfeder.
114. Bürstenhalterfeder.
115. Isolierende Lager.
116. Bürstenhalter.
117. Einstellschraube f. d. Reglerfeder.
118. Schmierdeckelschraube.
123. Deckel des Magnetgehäuses.
124. Maschinenwelle.
152. Oberer Magnetschenkel.
152½. Unterer Magnetschenkel.
155. Anker.

Fig. 147: Kleine Gleichstrom-Turbodynamo (2 KW 5000 Touren bis 20 KW 3600 Touren, 65—115 Volt) der A. E. G. Berlin. Zweiteiliges Gehäuse, lamellierte Pole und Polschuhe, letztere sind angeschraubt. Die Ankerwicklung wird durch

Fiberkeile, sowie Bronze- und Stahldrahtbandagen gehalten. Der Kommutator wird durch glimmerisolierte Schrumpfringe aus Nickelstahl zusammengehalten, die Stromabnahme erfolgt durch Kohlenbürsten. Die Lager haben Pressölschmierung durch eine ventillose Rotationspumpe, sowie Wasserkühlung der Lagerschalen. Das fliegende Turbinenrad hat drei Schaufelkränze mit eingesetzten Schaufeln. Diese Type hat folgende Gewichte:

KW	2	5	10	15	20
u	5000	4500	4000	4000	3600
Gewicht	200	360	630	800	1220 kg

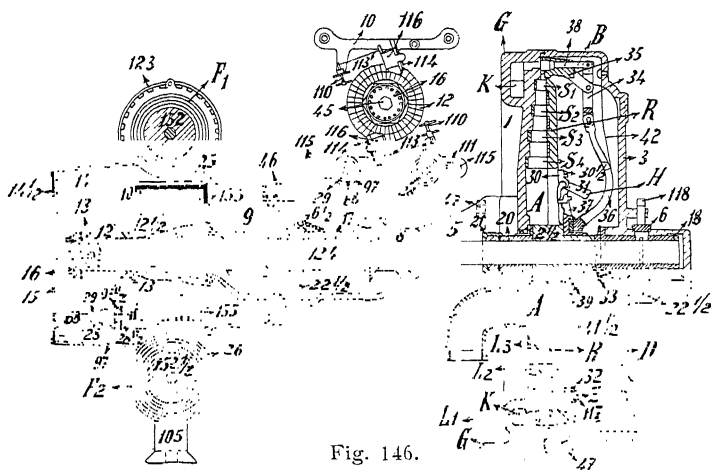



Fig. 146.

Fig. 148: Grössere Gleichstrom-Turbodynamo der A. E. G. Berlin: 50—300 KW 3000 Touren, 500 KW 2000 Touren, 750 KW 1500 Touren; die neuen Typen sind kompensiert.

Fig. 149: Gleichstrommaschine 250 KW, 400 Touren, 600 Volt der E. G. Alioth:

1. *Anker.* a) Bleche. Äusserer Durchmesser d = 800 mm, Umfangsgeschwindigkeit 17 m/Sek., innerer Durchmesser d_i= 390 mm inkl. Bolzen, Breite l zwischen den Flanschen 500 mm, vier Luftkanäle von 10 mm Breite, Nutenzahl 120, Stempelmasse 11,5 × 26,5 mm. b) Wicklung. 120 Elemente à 2 Ab-

teilungen à 1 Windung, Länge der Windung 2,4 m. Kupferdimension blank 3×10, isoliert 4×11 mit 120 Ausgleichsleitern, Widerstand kalt 0,021 Ω, Widerstand warm 0,025 Ω, pro Nut 4 Leiter = 4 Drähte, Art der Wicklung Parallelschaltung als Schleifenwicklung, Anzahl Stromkreise 4,

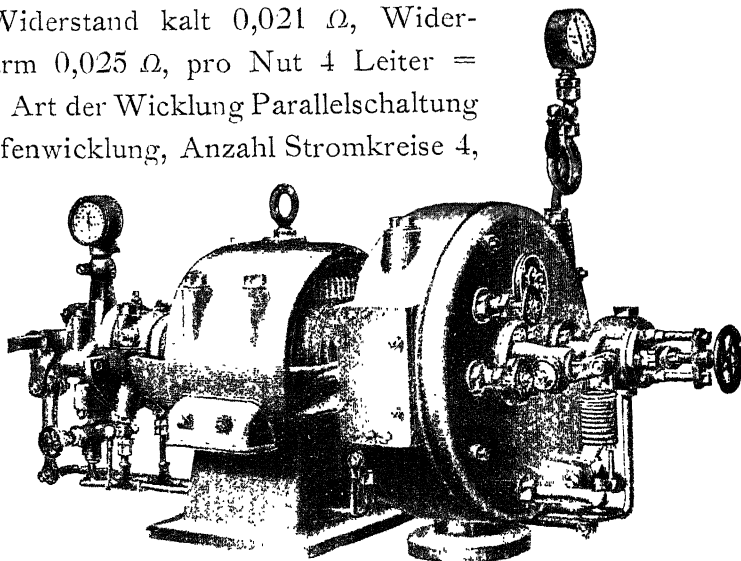



Fig. 147. A. E. G. Berlin.

Schritt-Lamelle 1—2—3, Schritt-Nute 1—31—2—32. c) Kollektor. d_k = 480 mm, Umfangsgeschwindigkeit 10 m/Sek., Anzahl Lamellen 240, Volt pro Lamelle 10, nützliche Breite 320 mm, Zahl der Stifte 4, Bürsten pro Stift 9, Kohlendimensionen 12 × 30, Qualität der Kohlen K.

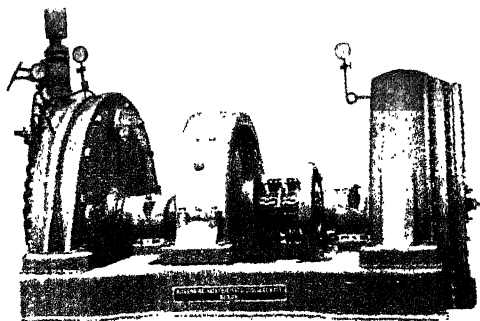



Fig. 148. A. E. G. Berlin.

2. *Pole*. Luftraum 12 mm, Bohrung 825 mm, Polzahl 4, Polbogen 525, Polschuhe axial 480, Polschuhe massiv, Kerndimensionen (Stahl) Φ 415, Kernquerschnitt 1280 qcm, Polbogen zu Teilung 0,8.

3. *Gehäuse.* Gehäusequerschnitt (Grauguss) 1300 qcm, Übergangsquerschnitt Stahl auf Grauguss Φ 455 oder 1625 qcm.

4. *Erregung.* Nebenschluss. Windungen pro Pol 2800, Draht blank Φ 2,2, Draht isoliert Φ 2,6, totale Länge 18,4 km, Wickellänge 160, Wickeltiefe 120, mittlere Windungslänge 1,60 m, Widerstand kalt 85,0 Ω, Widerstand warm 100 Ω.

Fig. 150: Wechselstrom-Gleichstrom-Umformer für eine elektrische Lokomotive der Maschinenfabrik Oerlikon:

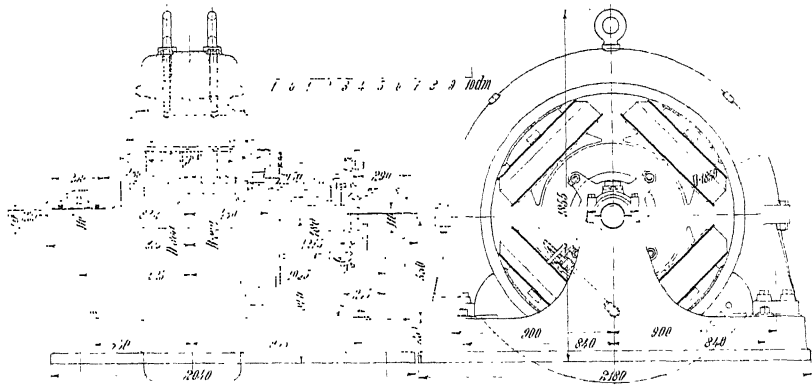



Fig. 149. E. G. Alioth, 250 KW, 400 Touren.

Wechselstrommotor: 6 polig, 520 PS, 1000 Touren, 50 Cycles, $\frac{14000}{700}$ Volts; $\frac{31}{620}$ Amperes (einphasig).

Gleichstromgenerator: 4 polig, 342 KW, 1000 Touren, 33,3 Cycles, 600 Volts, 570 Amperes.

Wechselstrommotor. Stator: Hochspannung 24 Nuten (4 pro Pol) halbgeschlossen 26×90, pro Nut 100 Leiter à 1 Draht von 3,2/3,8, Isolation 6,5 mm. Niederspannung 60 Nuten (10 pro Pol) halbgeschlossen 10×55, pro Nut 2 Leiter (Stäbe) $\frac{22 \times 7}{24 \times 9}$, Nutenisolation 0,5 mm. Rotor: Kurzschlussanker 196 Nuten total $6{,}5 \times 35{,}5$ à 1 Stab 6×35.

Gleichstromgenerator. Armatur: 80 Nuten $13{,}5 \times 40$; pro Nut 6 Stäbe $\frac{2{,}5 \times 16}{3{,}5 \times 17} = 2 \times 3$ Leiter, Schleifenwicklung $y_1 = 101$; $y_2 = 103$. Kollektor: Diam. 400, Anzahl Lamellen 240, Micaisolation 0,8 mm. Magnete: 4 Spulen in Serie für Separaterregung von 100 Volt, pro Spule 530 Windungen in 18 Lagen; Draht 4,8/5,2. Kompensationswicklung: Pro Pol 20 Nuten $38{,}5 \times 9$, pro Nut 1 Leiter aus 2 Stäben ||, Stab 3×32.

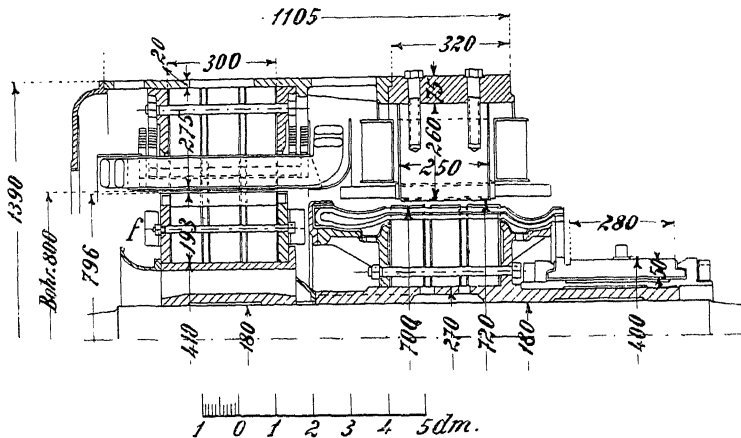



Fig. 150. Maschinenfabrik Oerlikon, 342 KW, 1000 Touren.

Beispiele für die elektrischen Masse siehe Tabelle III.

Nachstehend noch ein Vergleich ausgeführter Maschinen bei grosser und mässiger Tourenzahl:

KW Gleichstrom	100	100	330	330	640	640
Touren	3500	200	3000	125	500	94
Volt	220	220	650	550	800	550
Pole	2	12	2	10	6	12
Ankerdurchmesser d	350	950	520	1900	1140	2300
Eisenlänge l	350	250	360	350	380	450
Kommutatordurchmesser	180	690	300	1650	700	1650

Tabelle III. Ausgeführte hochtourige Gleichstromdynamos.

v Ankerumfangsgeschwindigkeit.

KW	Touren (n)	Volt	Polzahl	Anker ⌀	Eisenlänge	v m/Sek	C KW/d²ln	Flux 10^6	Luftspalt	Kommutator ⌀	v_k**	Bauart	Lager d l	Erbauer	Anmerkungen
1	1800	65	2	160	80	15	0·27			70	6·6	normal			
10	2800	110	2	190	190	27·8	0·52	0·6			--	normal		Gen. El. Co.	
30	5000	110	2	260	100	68	0·89	1·6		150	39·3			Lahmeyer	
80 PS	1200	300	4	440	230	28	PS/d²ln 1·5	3·8	5	300	18·8	normal	80 240	Union E. G.	
100	3500	220	2	350	350	64	0·67			180	33	Déri	85 ⌀	Brown Boveri & Co.	68 halbgeschloss. Nuten à 6 Stäbe 16 × 11, Nutenmasse 40 × 4,5 Schleifenwicklg. mit 17 Ausgleichsringen, 204 Lamell., 4 Bürstenstifte zu 8 Bürsten 12 × 25 mm
200 PS	1455	500	4	560	390	42·6	PS/d²ln 1·16		10	300	22·8	4 Hilfspole		Oerlikon	
150	3000	250	2	450	500			4·2		260		4 Hilfspole		Oerlikon	
160	3000	230	4	550	300	87	0·59	3·6	15	230	36·2			Lahmeyer	
180	3500	150–650	2	400	350	72	0·92		7·5	220	40·3	Déri		Brown Boveri & Co.	
200	780	250	4	Doppeldynamo 551 2 × 120		22·6	1·0		2	270	11	Lavalturbine	90 230	Breguet	
200	2000	230	?	500	300	52·4	1·34	9	20	280	29·4	normal	100 300	A. E. G.	
250	2700		4	520	350	73·7	0·98		10	260	36·7		80 400	Brown Boveri & Co.	
250	500	110/600	4	854	440	22·4	1·68	16	10	480	12·6			Oerlikon	
250	400	600	4	800	500	16·8	1·96	18	12	480	10			Mioth	120 Nuten 240 Lamellen
300	500	500	6	914	305	24	2·36	9·5				normal		Gen. El. Co.	Nutzahl [illegible], Nutmasse [illegible], 4 Stäbe [illegible] pro Nut, [illegible]fache Wellenwicklung [illegible], 408 Segm. Stator mit 18 Nuten [illegible] 70 mm für die Kompensationswicklung und 4 grosse Nuten für die Nebenschlusswicklung, siehe Niethammer, Elektr. Masch. u. Anl. Bd. I, Fig. 153 und S. [illegible]
315	450	190	8	1100	320	26	1·8	6·3	10	625	14·8		120 ⌀	Oerlikon	
330	3000	650	2	520	360	82	1·13		5	300	47	Déri	[illegible]	Oester. Union	
350	1000	600	4	700	300	36·7	2·38	7·5	10	400	21	Kompens.-wicklg.	150 ⌀	Oerlikon	
400*)	250	2 × 1350	6	1250	2 × 550; Doppeldynamo	16·4	1·11			750	9·8	normal		Thury	
500	1800	500	4	650		61	—		--	260	24·5			Gen. El. Co.	
500	400	600	8	1500	260	31·5	2·13	10·7		865	18·2	normal		Gen. El. Co.	
500	375	440/600	8	1300	380	25·5	2·07	10·5	15	800	15·7	normal	-		152 Nuten 11 × 40 456 Lamellen
560	333	160	12	1500	400	26·2	1·87	8	8	900	15·7	normal	-	Oerlikon	m. stehend. Welle, 204 Nuten à 2 Leit. [illegible]
640	500	800	6	1140	380	30	2·6	18	—	700	18·4	-	140×410	Rieter	408 Ausgleichsgabeln, 2 Lamellen bilden elektr. ein Stück.
800	300	600	10	1870	280	29·4	2·72	12·8	—	1030	16·2	normal		Gen. El. Co.	
900	1000	470	6	1100	230	58	3·2	9·5	12	500	26·2	normal			
900	1000	470	6	1420	305	76	1·6	-	-	-	--	normal	--	Parsons	
1000	240	600	12	2000	330	25·2	3·17	12·9		1320	16·8	normal		Gen. El. Co.	
1000	250	320	14	2400	300	31·5	2·32	11	-	-	-	—		Gen. El. Co.	
1530	200	550	16	2743	585	28·8	1·74	34	16	1677	17·5		350×760	Siemens	

Einankerumformer (wie Gleichstrommaschinen).

KW	Touren (n)	Volt	Polzahl	Anker ⌀	Eisenlänge	v m/Sek	C	Flux	Luftspalt	Kommutator ⌀	v_k	Bauart	Lager	Erbauer	Perioden
100	750	120	8	546	170	21·4	2·63	2·3	3·5	357	14		--	Union E. G.	50
500	750	550	8	840	420	33	2·26	9	8	600	23·5	—	[illegible]	Siemens & Halske [illegible]	50
500	500	600	6	1200	300	31·5	2·31	11	—	850	22·3	--	—	---	25
1000	300	550	16	1900	290	30	3·2	7		1300	20·5		--	---	40

*) Daten für eine andere Hochspannungsdynamo mit einfacher Wellenwicklung siehe Niethammer, Elektr. Maschinen und Anlagen, S. 455.

) Alles in m. *) Kommutatorgeschwindigkeit.

VENTILATION UND MECHANISCHE ZUBEHÖR.

ERWÄRMUNG UND VENTILATION.

Die Erwärmung T in Grad C eines mit der Geschwindigkeit v rotierenden Maschinenteiles, in dem A_v Watt Verluste erzeugt werden und der eine Oberfläche von F qcm hat, ist angenähert

$$T = C \frac{A_v}{F(1 + 0,3\sqrt{v})}. \qquad (40)$$

Lässt man nun eine gegebene Maschinentype statt mit v mit m v laufen, so wächst die Klemmenspannung von E auf m E. Der Strom sei beidemal J. Die Kupferverluste A_k bleiben bestehen (von der Erregung werde abgesehen). Die Eisenverluste $A_H + A_W$ (Hysteresis + Wirbelströme) aber gehen über in

$$m\,A_H + m^2 A_W.$$

Die Übertemperaturen T und T_m bei v und m v verhalten sich also

$$T : T_m = \frac{A_k + A_H + A_W}{1 + 0,3\sqrt{v}} : \frac{A_k + m\,A_H + m^2 A_W}{1 + 0,3\sqrt{m}\sqrt{v}}. \qquad (41)$$

Die Übertemperatur wächst danach zweifelsohne mit m mehr und mehr. Legt man eine gewisse Grenze $(T_m)_{max} = 50^0$ fest, so tritt bei einem gewissen m v der Fall ein, dass $A_k = 0$ sein muss, dass also die Maschine überhaupt keinen Strom mehr abgeben kann, d. h. dass die Maschine schon durch die Eisenverluste auf die zulässige Grenze erwärmt wird und keine Nutzleistung mehr abgeben kann. Keinesfalls darf eine proportionale Steigerung der Leistung mit der Tourenzahl angenommen werden, wenn man einmal zu hohen Umlaufszahlen kommt.

Diese Steigerung der Übertemperatur T eines gegebenen Modelles mit zunehmender Geschwindigkeit geht auch aus dem Ausdruck für die Übertemperatur hervor:

$$T = \frac{c_1 + c_2 v + c_3 v^2}{(1 + 0{,}3 \sqrt{v}) F}, \tag{42}$$

worin c_1 die Kupferverluste und $c_2 v + c_3 v^2$ die Eisenverluste sind. Meist ist schon bei mässigem v der Wert $c_2 v + c_3 v^2 > c_1$, umsomehr bei hohem v. Die Verluste wachsen also mit zunehmendem v rascher als die Abkühlungsfähigkeit $(1 + 0{,}3 \sqrt{v}) F$. Aus der obigen Betrachtung folgt nun zunächst, dass es ratsam ist, die ursprünglichen Eisenverluste $A_H + A_W$ klein zu halten, will man ein möglichst kleines T_m erzielen, d. h. bei Turbodynamos müssen die Eisenquerschnitte sehr gross gewählt werden und es kann sich sogar empfehlen, 0,3 mm Blech zu verwenden, um A_W klein zu halten. Dazu kommt noch, dass bei Turbodynamos in der Regel der Flux per Pol und auch die Periodenzahl (speziell bei Gleichstrom) sehr gross ist. Bei Gleichstromdynamos ist man allerdings in der Wahl der radialen Eisentiefe nicht unbeschränkt. Der äussere Ankerdurchmesser ist wegen der grossen Tourenzahl klein und der minimale Innendurchmesser ist durch die Wellenabmessungen gegeben. Diese Beschränkung fällt bei den Drehstromdynamos der Innenpol-

type weg; aber eine allzugrosse radiale Eisentiefe hat auch da den Nachteil, dass bei den kleinen Luftspaltdurchmessern die Eisenwege im induzierten Teil sehr verschieden lang werden und dass die Kraftlinien sich ungleichmässig über den Querschnitt verteilen, d. h. die äusseren Blechteile haben (bei der Innenpoltype) eine wesentlich geringere Induktion als die gegen den Luftspalt zu gelegenen, sie nützen also wenig.

Ausserdem bewirkt eine Vergrösserung der radialen Eisentiefe von h_1 auf h_2 nur eine Verringerung der Eisenverluste von 1 auf etwa $\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{0,6}$. So kommt es, dass bei tatsächlichen Ausführungen die Eisenverluste trotz aller Vorsicht beim Disponieren wesentlich grösser als die Kupferverluste ausfallen und raschlaufende Dynamos zeigen deshalb schon bei dauerndem Leerlauf eine Übertemperatur, die nicht stark von der Vollasterwärmung abweicht. Das rührt auch noch daher, dass das Kupfer die Wärme leichter ausstrahlt, als die tiefen und langen Eisenpakete. Die in den langen und tiefen Eisenpaketen absorbierte Wärme kommt nach dem Abstellen der Maschine noch besonders merkbar zum Vorschein und bedingt 10—30 Minuten nach Abstellung eine weitere Temperatursteigerung von 10—20°.

Der gedrängte, lange Bau der Turbodynamo bringt es nach dem Gesagten mit sich, dass die zur natürlichen Ausstrahlung vorhandene Oberfläche gegenüber den Verlusten, die auszustrahlen sind, recht klein, ja meist ungenügend ausfällt, so dass häufig zu künstlicher Kühlung *) zu schreiten ist. Es ist zunächst eine starke Unterteilung des Stator- und Rotoreisens durch radiale Kanäle von 15 bis 50 mm Breite erforder-

*) Eine vertikale Gleichstrommaschine mit eingebauten Schaufelventilator findet sich in Niethammer, Elektrische Maschinen und Anlagen Bd. I, Fig. 273, daselbst in Fig. 274 ein separat aufgestellter Ventilator und in Fig. 276 ein Maschinengehäuse und Lagerschilder mit Rippen.

lich, verbunden mit einer intensiven Ventilatorwirkung, die aber derart auszubilden ist, dass sie kein störendes Geräusch verursacht. Dieser Bedingung entspricht besonders die von Brown, Boveri & Co. gebaute Anordnung (Fig. 150a), D. R. P. 148 976.

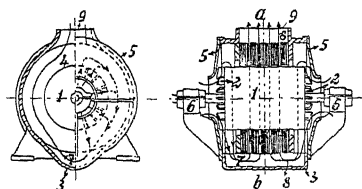



Fig. 150 a.

Der Verlauf der Luftströmung durch und um die ganze Maschine ist durch Pfeile angegeben. Die Luft wird entweder von der Seite an der Welle oder besser von unten her angesaugt, von den Rotorkanälen nach den Statorkanälen geschleudert, sie umspült den ganzen Statorkörper und verlässt ihn oben. Von der Dampfturbinenseite her sollte keine Kühlluft angesaugt werden, da sie zu heiss ist*). Die Kanäle im Stator und Rotor liegen häufig je in einer Ebene, doch werden sie zweckmässiger Weise gegeneinander versetzt, wobei der Luftwiderstand grösser ausfällt. Besonders wirksam sind Lüftekanäle in den Seitenflanschen (Fig. 149). Die Maschinen mit ausgeprägten Polen erzeugen wohl auch einen intensiven Luftzug, aber gleichzeitig einen störenden Lärm, so dass sie meist zu einem glatten Zylinder abgedeckt werden (Fig. 151). Manche Firmen versehen das Gehäuse zur Vergrösserung der ausstrahlenden Oberfläche mit Rippen (Fig. 152 von Brown, Boveri & Cie.) oder legen

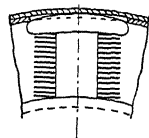
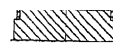



Fig. 151.

Wasserkühlschlangen in den Rücken der Gehäuse (Fig. 153), über welche die erhitzte Luft durch Flügel f getrieben wird. In Fig. 154 (D. R. P. Nr. 96 532 von Schuckert) durchsetzen die Kühlröhren k direkt das aktive Eisen. Man führt wohl auch das Gussgehäuse doppelwandig aus und presst durch den Zwischenraum zwischen beiden Wänden Kühlwasser (Fig. 155).

*) Siehe auch Fig. 56 und 117. sowie Z. f. E. Wien, 20. Aug. 1905, Fig. 1.

Bei Anordnung der Ventilationsvorrichtungen an Turbodynamos ist vor allem darauf zu achten, dass die Luft nicht einfach in lokale Wirbelbewegung versetzt wird, sondern dass die warme Luft ab und die kalte laufend zugeführt wird. In den Rotor, Fig. 155a, sind zu diesem Zwecke besondere Leitbleche l angebaut. In die Maschine eingebaute Flügel erfüllen häufig diese Bedingung nicht; am sichersten wirkt ein unab-

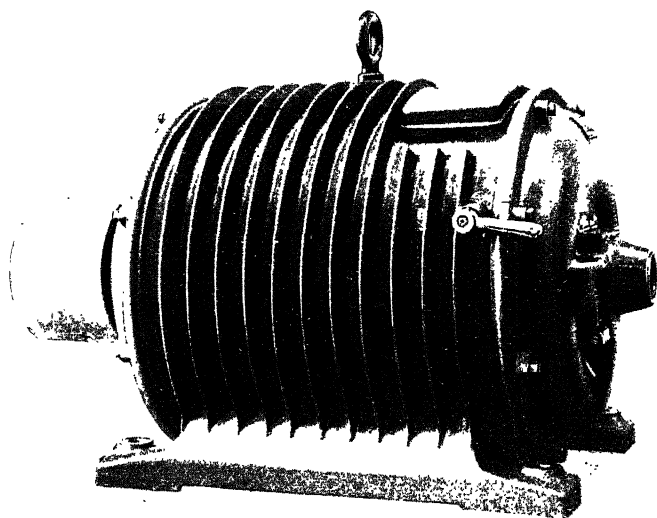



Fig. 152. Brown, Boveri & Co.

hängig aufgestellter Ventilator, welcher die Luft quer durch die abgeschlossene Maschine treibt (Fig. 156 aus U. S. P. 771 468). Um den Druck der Luft nicht unzulässig steigern zu müssen, ist es zweckmässig, auf einer Seite oben einen Ventilator, auf der anderen unten einen Exhaustor wirken zu lassen. Eingebaute Flügel kann man auf zwei prinzipiell verschiedene Arten anordnen: einmal so, dass die Luft an beiden Rotorenden an der Welle angesaugt und radial nach aussen geschleudert wird

(Fig. 156a und 157 von Bartelmus, Donat & Co. und 156b von Siemens & Halske D. R. P. 144107), oder so, dass die Luft nur auf einer Seite angesaugt und achsial durch die Maschine getrieben wird. Bei ersterer Ausführung ist eher ein Pfeifen zu befürchten, was dadurch zu mildern ist, dass man die Kanäle im Rotor und Stator achsial versetzt.

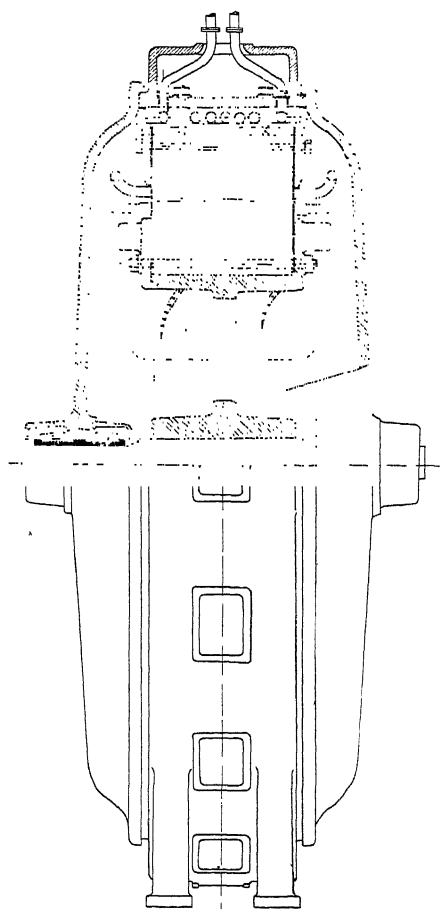



Fig. 153.

Die Ventilationsflügel können als Schraubenflächen oder als Schaufeln ausgebildet sein.

Die Ventilation darf nicht zu heftig sein, da sonst die Luftreibungsverluste zu hoch ausfallen, deshalb bilde man den Rotor als möglichst glatte Walze aus.

Aus obigem ist ersichtlich, dass die Kühlung auf zwei prinzipiell verschiedenen Wegen erreicht werden kann:

a) durch *natürliche* Kühlung, dadurch dass man die Maschine möglichst *offen* und mit freiem Luftzutritt baut, sowie mit vielen Lüftekanälen, grosser Oberfläche und Schleuderflächen versieht; solche Maschinen laufen selten geräuschlos;

b) durch *künstliche* Kühlung. Dabei wird die Maschine ganz abgeschlossen und das Kühlmittel wird durchgepresst; diese Methode verringert den Wirkungsgrad öfters mehr als *a*.

Sehr wichtig ist bei natürlicher wie künstlicher Kühlung nicht nur eine starke Unterteilung des Eisens, sondern auch eine luftige Ausführung der Wicklungen besonders der Stirnverbindungen (Fig. 157 a und 157 b), um der Luft zu möglichst viel Oberfläche direkten Zutritt zu geben. Die Kommutatorkörper sind ebenfalls mit Kanälen und Flügeln (schrägen Rippen) zu versehen; zwischen Lamellen und Körper darf kein Luftsack bleiben; in Fig. 157 c bildet die Siemens & Halske A.-G. die Kommutatorverbindungen als Flügel v aus. Um die Ventilationswirkung bei Vor- und Rückwärtslauf im gleichen Sinne zu ermöglichen, kann man die Flügel nach Fig. 157 d drehbar anordnen, so dass sie sich selbst einstellen können. Die Hooven, Owens Rentschler Co., Hamilton, Ohio, wirft vermittels eines Injektors Kühlluft durch die hohle Welle in die radialen Luftkanäle mit spiralförmigen Schaufeln; in den Feldmagneten sind überdies radiale Kanäle vorgesehen. (Z. f. E., Wien 1905, S. 497).

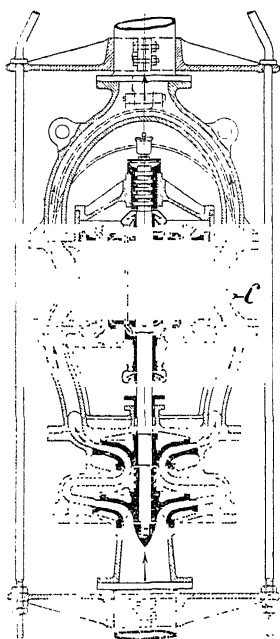



Fig. 154.

Fig. 155.

Eine wesentliche Erhöhung der Erwärmung ist bei Turbodynamos in der Regel dadurch bedingt, dass bei den hohen Tourenzahlen leicht starke zusätzliche Wirbelstromverluste in den Ankerleitern*) und den verschiedenen Konstruktionsteilen auftreten. Da die Frequenz n_c der Kom-

*) Siehe „Niethammer", Elektrische Maschinen und Apparate, Bd. I, S. 564 ff. Nach Z. V. D. I. 1905 S. 1341 sind die Wirbelstromverluste in den Kupferleitern pro c^3.

$$1{,}23\ n^2\ f^2\ (aw)^2\ s^{1,5}\ 10^{-10}\ \text{Watt}$$

n = Periodenzahl, f = Formfaktor der E. M. K., aw = Amperewindungen pro cm Zahnhöhe, s = Kupferdicke in cm quer zur Nut.

mutierung bei Turbogleichstromdynamos ziemlich gross ist (1000 und mehr), so können sowohl in den Ankerleitern als auch in den Ankerzähnen, sowie in den Kommutatorsegmenten ganz beträchtliche Wirbelströme auftreten, die angenähert $i_k^2 n_c^2$ proportional sind (i_k = Kurzschlusstrom).

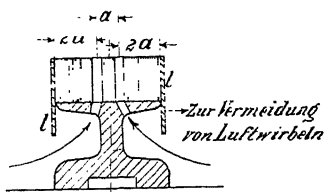



Fig. 155 a.

Eine für künstliche Kühlung (Luft-, Wasser- oder Ölzirkulation) eingerichtete Maschine wird am besten völlig gekapselt, damit die günstigsten Luftströmungen erzeugt werden können. Ist F die

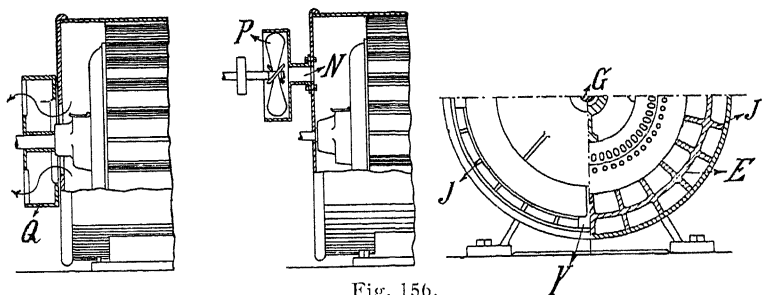
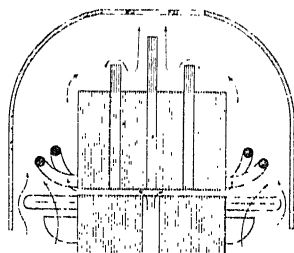



Fig. 156.

gesamte äussere Oberfläche der Maschine in qcm, so gilt für die Übertemperatur T Grad C einer solchen Maschine

$$T \frac{F}{C_g} + 4160 \cdot T' s_w s_g Q = A_v \quad (43)$$

Fig. 156 a.

$C_g = 900$ bis 1500, $T' = 50$ bis 80 % von T = Übertemperatur der abströmenden Kühlflüssigkeit, s_w = spez. Wärme (W E pro kg), s_g = spez. Gewicht (kg pro dm³), Q = Sek.-Liter Kühlflüssigkeit, A_v = totale Wattverluste in der Maschine.

	Wasser	Öl	Luft
s_w =	1	0,4	0,24
s_g =	1	0,9	0,00129

Bei Luftkühlung benutzt man 20 bis 100 mm Wassersäule und Luftgeschwindigkeiten < 1 m/Sek.; bei Wasser-

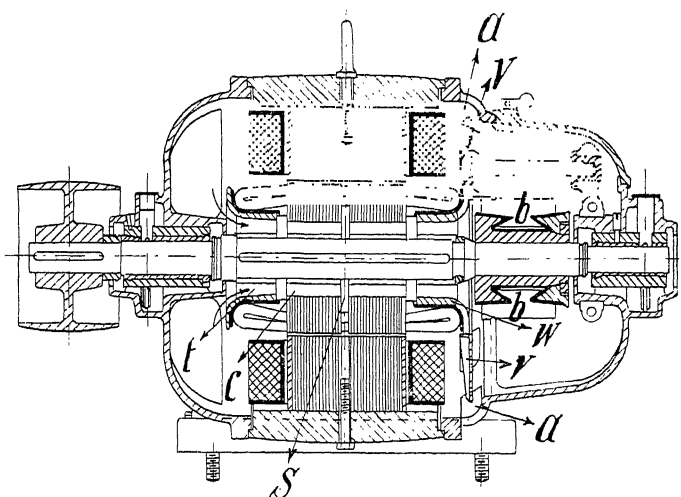



Fig. 156 b.

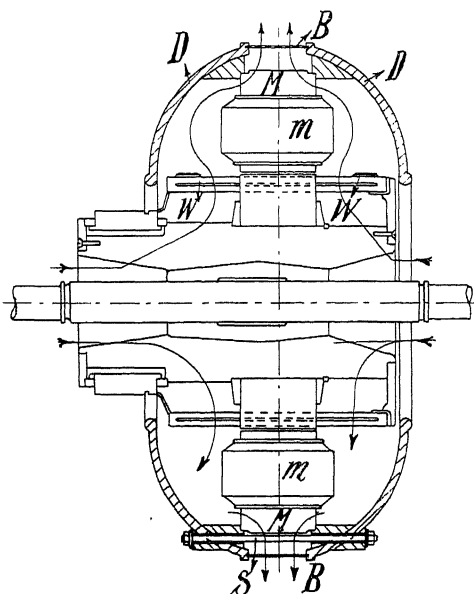



Fig. 157.

und Ölkühlung genügt ebenfalls meist weniger als $^1/_2$ bis 1 Atmosphäre Überdruck.

Die Feldspulen von Turbodynamos der Aussenpoltype sind durch axiale und radiale Kanäle (Fig. 157e und 144) gut zu unterteilen; auch bei der Innenpoltype von Drehstromgeneratoren kann sich bei dicken Feldspulen das Einfügen eines Lüftekanals empfehlen (Fig. 50).

Die Zeit t in Stunden nach der eine Maschine, die aus G_e kg Eisen, G_k kg Kupfer, G_i kg Isolation, G_0 kg Öl, G_w kg

Wasser, V_1 dm³ Luft besteht, bis auf 1% ihre Endtemperatur T_e erreicht, ist (44)

$$t = 5{,}3 \frac{T_e}{A_v} \left(0{,}11\, G_e + 0{,}09\, G_k + 0{,}5\, G_i + 0{,}4\, G_0 + G_w + 0{,}24\, V_1\right)$$

Bis auf a% wird die Endtemperatur T_e erreicht nach

$$t_a = \frac{t}{4{,}6} \ln\left(\frac{100}{a}\right) \text{ Stunden.} \qquad (45)$$

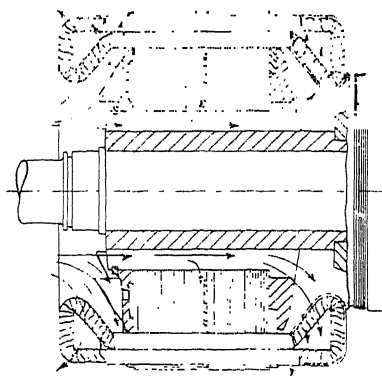



Fig. 157 a.

Der Effektbedarf A_l für *Luftreibung* in KW kann aus der für Scheiben gültigen Formel

$$A_l = \beta \cdot d^2\, v^3\, \gamma$$

(d = Scheibendurchmesser, $\gamma = 1{,}29$ für Luft, $\beta = 1{,}1$–25) für Dynamoanker ermittelt werden zu

$$A_l = c \cdot v^3 \left| d^2 (c' \cdot n_k + 1) + c'' \, dl \right| \text{ in KW}$$

$c = 2$—5, v = äussere Umfangsgeschwindigkeit in m/Sek., d = äusserer Durchmesser des rotierenden Teils in m, n_k = Zahl der Lüftekanäle, $c' = 0{,}4$—1, $c'' \leq 4$, l = totale Rotorlänge samt Wicklung. Sind zur Kühlung Q cbm/Sek. Luft bei einem

Druck von h = 20 — 100 mm Wassersäule erforderlich, so ist der hiezu gehörige Energiebedarf in KW

$$\frac{Q \cdot h}{75 \cdot \eta} \, 0{,}736 = c''' \cdot Q\,h$$

$$c''' = \frac{1}{40} \quad \frac{1}{70}.$$

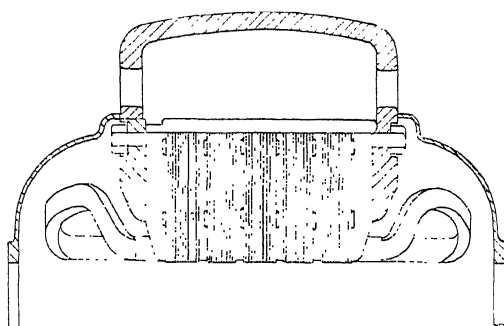
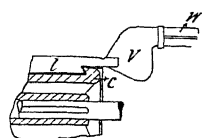
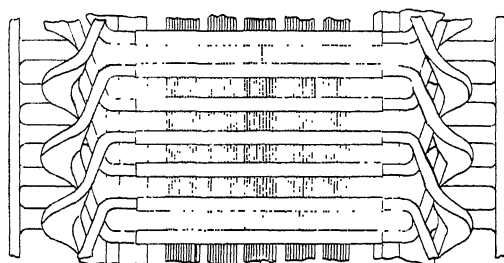



Fig. 157 c.

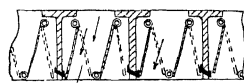



Fig. 157 d.

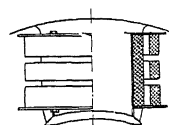
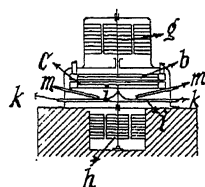



Fig. 157 b.

Fig. 157 e.

Fig. 158.

Die Erwärmung der Turbodynamos und der Turbinenlager wird durch Wärmemitteilung von den Dampfräumen aus bedeutend erhöht, es trifft dies besonders für die stehende Anordnung zu, weshalb in D. R. P. 153 252 der Kondensator zwischen Turbine und Dynamo geschaltet wird (Fig. 158).

WELLE UND LAGER.

Ist l der Abstand der Lagermitten und d der maximale Wellendurchmesser (in cm) so ist die *Wellendurchbiegung* f^{cm}

$$f = \left(\frac{0,94}{d}\right)^4 \alpha\, l^3 \left\{ 2p(G_p + G_s) + G_k + G' + G'_w + G'_z \right. \qquad (46)$$

0,94 setzt als Längsschnitt der Welle eine kubische Parabel voraus; ist er ein Rechteck, so tritt dafür 0,81.
G' = Gewicht der Arme + Nabe (Armstern),
G'_z = einseitiger magnet. Zug

$$= 0{,}5\, p\, F_p \left\{ \left(\frac{B_{max}}{5000}\right)^2 - \left(\frac{B_{min}}{5000}\right)^2 \quad 1 \qquad {}^2 \right\}^{1/2} \text{ in kg}$$

B_{max} und B_{min} aus Fig. 90, $2p$ = Polzahl, F_p = Polrandfläche pro Pol, δ = Luftspalt, ε = Exzentrizität.
G'_w = Wellengewicht. G_p, G_s und G_k siehe Seite 52 ff.

Man lasse als Durchbiegung f höchstens 3 – 5 % des Luftspaltes δ zu, woraus sich der maximale Wellendurchmesser d ergibt.

Das Biegungsmoment der Welle in cmkg ist:

$$M_b = \left[2p(G_p + G_s) + G_k + G' + G'_w + G'_z \right. \qquad \text{in kg und cm.}$$

Das Torsionsmoment ist in kgcm (η = Wirkungsgrad):

$$M_d = \frac{KW}{\eta \cdot 9{,}81} \cdot 10^6 : \frac{\pi u}{30}.$$

Das resultierende Moment wird:

$M = 0{,}35\, M_b + 0{,}65 \sqrt{M_b^2 + M_d^2}$. Somit ist die resultierende Beanspruchung der Welle $= \dfrac{M}{0{,}1\, d^3} < 500 : 1000$ kg/cm² je nach Güte des Materials.

Die *kritische Winkelgeschwindigkeit* der Welle ist:

$$\frac{\pi\, u_k}{30} = \omega_k = c \;/\; \frac{\Theta}{\cdot G} \qquad (47)$$

Θ = Trägheitsmoment der Welle in cm^4, α = Dehnungskoeffizient $\left(\frac{1}{2 \cdot 10^6}\right.$ bis $\left.\frac{1}{2{,}2 \cdot 10^6}\right)$, G = Gewicht des Rotors samt Welle in kg, l = Abstand der Lagermitten, c = 39 für beiderseits frei aufliegende Wellen und c = 87 für beiderseits eingespannte Wellen. Nach Behrend soll c für Turbodynamos 270 sein. Ausser der angegebenen ersten kritischen Winkelgeschwindigkeit treten periodisch noch weitere auf und zwar verhalten sie sich zur ersten wie

$1 : 2^2 : 3^2 : 4^2 : \ldots$ bei frei gelagerter Welle, und wie

1 : bei eingespannter Welle.

Die *Zapfengeschwindigkeit* w_z von Turbodynamos liegt meist zwischen 5 und 15 m/Sek., der Zapfendruck p zwischen 2 und 10 kg/cm² d. h. das Produkt $p \cdot w_z$ zwischen 10 und 120, in der Regel zwischen 50 und 70. Die Zapfenlänge l_z ist meist $2^1/_2$ bis 4 mal Zapfendurchmesser d_z. Die Zapfenbeanspruchung auf Biegung ist 200 ÷ 500 kg/cm². Kühlt man ein Lager mit dem Zapfendurchmesser d_z und der Länge l_z je in cm vermittelst Q Liter/Sek. irgend einer Kühlflüssigkeit vom spez. Gewicht s_g und der spez. Wärme s_w, so ist:

$$\gamma\, d_z\, l_z\, w_z^{\,3/2} = c \cdot d_z\, l_z\, (t - t_0) + a \cdot Q \cdot s \cdot s_w\, (t' - t^0) = \text{Reibung in Watt}$$

$\gamma = \infty\, 0{,}07$, falls w_z in m/Sek.; $c = {}^1/_{1800}$ bis ${}^1/_{600}$, ersterer Wert bei leichter Lagerkonstruktion, letzterer bei massiger und grosser Oberfläche; a = 425, t = Zapfentemperatur, t_0 = Temperatur der Umgebung, t' = Temperatur des abfliessenden, t'_0 die des zufliessenden Kühlmittels in Grad C. Für Wasser ist s = 1,

$s_w = 1$; für Öl $s = 0,9$ und $s_w = 0,4$; t sei $< 60^0$, $t' < 50^0$. Man rechnet häufig 0,035 Liter Wasser pro cm^2 Lagerfläche und Minute.

Ausser den in „Dampfturbinen" S. 31 besprochenen *Lagern* findet man für hochtourige Maschinen auch Kugellager (Fig. 71) sowohl bei liegenden wie stehenden Wellen; sie haben jedoch für Zapfengeschwindigkeiten von 8 m/Sek. und mehr die Feuerprobe noch nicht bestanden, sie machen dann vielfach Geräusch.

Das Lager Fig. 159 erhält durch Einfügen der Trennwände a b eine kräftige Ölzirkulation (J. J. Rieter & Cie., Winterthur).

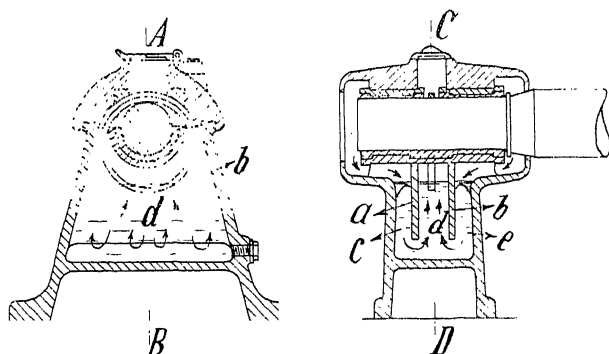



Fig. 159.

Für Turbodynamos mit mehr als 2000 Touren findet man öfters noch das Dreischalenlager (Fig. 10), bei dem die Zwischenräume zwischen den Schalen als Ölkissen ausgebildet sind. Die 3 Schalen sind etwas exzentrisch in einander drehbar, so dass das Wellenzentrum genau einjustiert werden kann. Für grosse Maschinen trifft man meist Gusschalen mit Weissmetallausguss (Fig. 16 ff in „Dampfturbinen"), für kleinere Typen einfache Bronzeschalen, in beiden Fällen mit radialen Löchern zur Einführung des Pressöls. Wenn der Rotor gut ausbalanciert ist, kann die obere Lagerhälfte mit etwa 1 mm Spiel aufgesetzt sein.

Die künstliche Kühlung der Lager kann entweder so erfolgen, dass Öl direkt auf den Zapfen („Dampfturbinen"

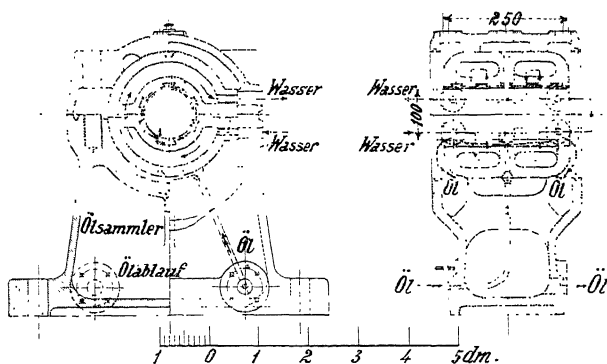



Fig. 160.

Fig. 16 ff) gepresst wird, oder aber es werden der Lagerkopf („Dampfturbinen" Fig. 22) oder die Lagerschalen (speziell die untere) mit Wasser gekühlt; Fig. 160*) ist ein Turbinenlager der A. E. G. Berlin, das sowohl Pressölschmierung als auch Wasserkühlung für die Lagerschalen besitzt.

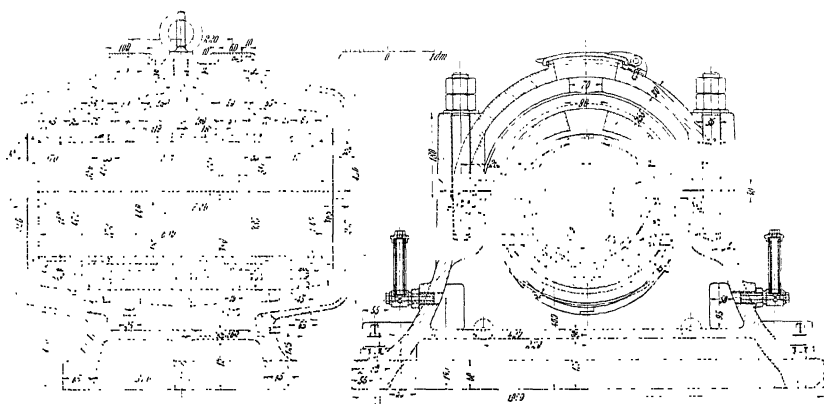



Fig. 160 a. Prager Maschinenfabrik vormals Ruston & Co.

Die Fig. 160 a zeigt ein mit Wasserkühlung versehenes Lager 240 × 600 mm einer Wasserturbine für 3500 PS 315

*) Nach Stodola, „Dampfturbinen" 3. Aufl.

Touren der Prager Maschinenbau A. G. vormals Ruston & Co., die Wasserkühlschlangen sind in die untere Lagerschale eingebaut. Ein ausserordentlich gut durchgearbeitetes Lager für hochtourige Dynamos ist der E. G. Alioth patentiert*): Die eigentliche Lagerschale ist in der Längsrichtung in zwei gleiche coaxiale Schalen geteilt. Jede Hälfte ruht in der Mitte mit relativ schmaler ringförmiger Auflagefläche auf einer Balancierhülse, die ihren Drehpunkt in der Lagerbockmitte hat und ebenso abstützt wie der bekannte Balancierbalken. Der Lagerdruck muss infolge dieser schwingenden Konstruktion in beiden Schalen gleich sein, das System schmiegt sich jeder Wellendeformation an und die Auflagerung auf der ganzen Zapfenlänge ist gewährleistet. Die Schmierung erfolgt durch Pressöl von unten, ausserdem ist aber auch Ringschmierung mit je einem Ring pro Schale vorhanden; die letzte Methode reicht selbst bei 11 m/Sek. Zapfengeschwindigkeit völlig aus. Zur Abfuhr der warmen Luft in dem Zwischenraum zwischen den Lagerschalen und der Balancierhülse ist ein Kamin auf die Lagerdeckelmitte aufgesetzt. Bei Zapfengeschwindigkeiten über 14 m/Sek. wird in die Ölkammer des Lagerbockes eine Wasserkühlschlange eingebaut, welche sowohl das Pressöl, als das Öl für die Ringschmierung kühlt.

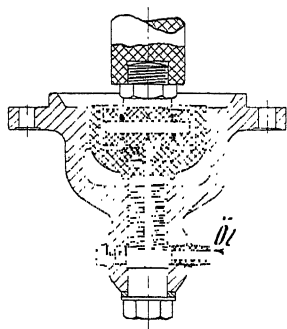



Fig. 160b.

Das Spurlager Fig. 145 für einen 560-KW-Umformer mit stehender Welle (340 Touren) ist von der Maschinenfabrik Oerlikon mit Ölzirkulation durch eine kleine Pumpe und mit Wasserkühlschlangen ausgerüstet. Das Öl wird in der Mitte der Lauffläche in einer 55 mm breiten Rinne eingepresst;

*) Siehe Handbuch der Elektrotechnik Bd. IV, 2. Aufl. und Z. V. D. I. 1906.

Innendurchmesser der Lauffläche = 192 mm, Aussen ϕ = 480 mm, w_z = 8,5 m/Sek. aussen, Lagerdruck 12,5 t, p = 8,5 kg/c², $p\,w_z$ = 72 (maximal).

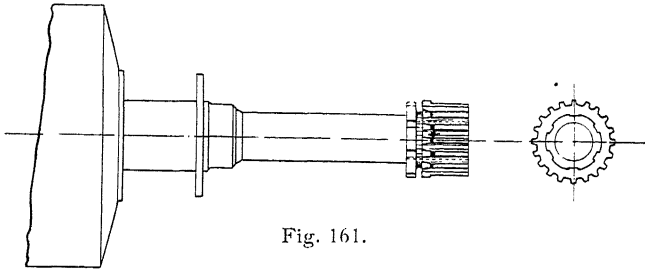



Fig. 161.

Die Maschinenfabrik Oerlikon lässt ihre Turbodynamos in stehender Anordnung auf Rollenlagern mit Pressölschmierung nach Fig. 160 b*) laufen.

Fig. 162.

Im E. P. 4416 (Jahr 1904) werden die Lager von Turbodynamos vollständig in den Rotor hineingebaut, d. h. der Rotorkörper läuft direkt ohne Welle z. B. auf Kugellager dicht bei der

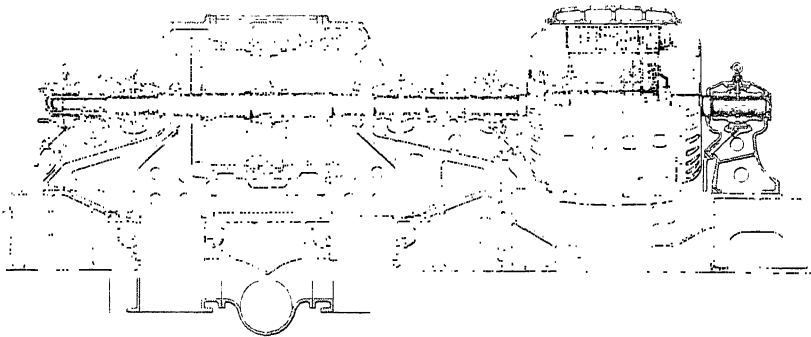



Fig. 163. 5000 KW, 1000 Touren.

Rotormitte; damit wird der Lagerabstand und die Lagerbeanspruchung klein und die kritische Winkelgeschwindigkeit weit hinausgerückt.

*) Nach Stodola, „Dampfturbinen" 3. Aufl.

Turbodynamos werden durch eine bewegliche *Kupplung* *) mit der Turbine gekuppelt (Fig. 161), sofern nicht die Turbinenräder fliegend auf der Dynamowelle sitzen. Fig. 162 zeigt die Kupplung einer 100-KW-Dynamo mit einer liegenden Curtisturbine und Fig. 163 (nach W. J. A. London) eine grosse Parsonsturbine mit ihrer Dynamo von etwa 5000 KW 1000 Touren, hergestellt von der British Westinghouse Co. Die Maschinenfabrik Oerlikon verbindet Turbine und Dynamo mit Hilfe der in Fig. 163a **) gezeichneten Nadelkupplung, die bei einem Aussendurchmesser von 275 mm 48 Verbindungsbolzen von 6 mm ϕ aus Stahl besitzt.

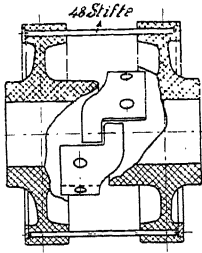



Fig. 163 a.

AUSBALANCIEREN.

Für die Welle ist es äusserst wichtig, dass sie gut zentrisch läuft, weshalb die einzelnen Bestandteile und Pakete des Rotors sowie der ganze Rotor nach dem Zusammenbau sorgfältig durch Abwiegen und auf Richte-Linealen statisch ***) ausbalanciert sein muss und einseitige magnetische Züge vermieden werden müssen. Letzterer Punkt führt dazu, auch bei den sogenannten kompensierten Gleichstromdynamos mit Hilfswicklungen (Ryan, Déri) den Luftspalt nicht zu klein und die Luftinduktion nicht zu hoch z : halten.

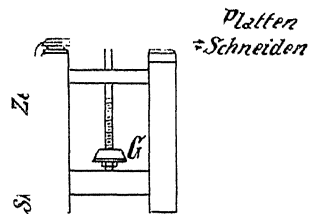



Fig. 164.

Der statische Balancierapparat der Westinghouse Co. (Electric Club Journal) ist in Fig. 164 abgebildet. Auf dieser

*) Für Wasserturbinen findet man meist die Zodel-Voith-Kupplung in Verwendung.
**) Nach Stodola. „Dampfturbinen“ 3. Aufl.
***) Siehe Niethammer, Elektrotechnische Fabriken, S. 223.

frei drehbaren Drehscheibe, deren Querarm auf Schneiden ruht, werden z. B. die rotierenden Endschilder ausbalanciert. Mit Hilfe des an der Drehscheibe befestigten und einstellbaren Gewichtes G kann man den Schwerpunkt beliebig nahe den Schneiden bringen. Das gut zentrierte Endschild erhält solange Zusatzgewichte oder Ausbohrungen, bis in allen Lagen des Schildes der Zeiger auf Null zeigt. Man liest den Zeiger in 2 um 180° verdrehten Stellungen der Drehscheibe ab, woraus sich direkt die Lage und der Betrag des erforderlichen Ausgleichgewichts ergibt.

An den Flanschen und Kappen der Rotoren einschliesslich der Kommutatoren (siehe Schrumpfringe Fig. 117) sind geeignete Aussparungen vorzusehen, in denen Ausgleichsgewichte angebracht werden können. Alle Konstruktionsteile sind symmetrisch anzuordnen z. B. nicht *ein* Keil, sondern 2 diametral gegenüberliegende.

Man balanciert zweckmässig einen Rotor nach Fig. 55 viermal aus: 1. ohne Nuten, 2. mit Nuten, 3. mit Wicklung, 4. fertiger Rotor.

Ein statisch ausbalancierter Körper kann noch exzentrische Massen in verschiedenen Ebenen haben, die wohl gleich gross sind, aber Kräftepaare erzeugen, welche die Lager erschüttern. Deshalb hat man die Rotoren auch *dynamisch* auszubalancieren.

Zum dynamischen Ausbalancieren lässt man zweckmässig den fertigen Rotor in zwei auf Federn gesetzten Lagern durch Riemenantrieb rotieren, während des Laufs markiert man mit Farbstift die nach auswärts strebenden Punkte, an denen Gewichte zuzufügen sind.

Die Generatoren der General Electric Co. werden auf einer flexiblen Welle in vertikaler Stellung ausbalanciert, und zwar durch rasche Rotation dieser Prüfwelle, wobei durch Anbringung von Ausgleichsgewichten die Rotations- und Wellenachse zur Koinzidenz gebracht werden. Dieser Prozess wird

zweimal vorgenommen, vor und nach einer längeren Dauerprobe z. B. mit $1\,^1/_2$-facher Geschwindigkeit, wobei sich ein eventuelles „Arbeiten“ der Isolation bemerkbar machen würde.

Nach Seidener (Z. f. E. 1905 S. 92) benutzt die A.-E.-G. folgende Vorrichtung zum Balancieren (Fig. 164 a): Zwei Lager von denjenigen Dimensionen, wie sie für die betreffenden Zapfen erforderlich sind, sind auf Grundplatten aufgestellt und befinden sich, damit diese Lager auf der Grundplatte frei beweglich sind, auf je einer Schar von Kugeln. Das Lager wird ferner auf beiden Seiten nicht befestigt, sondern nur mit Federn angedrückt. Der rotierende Körper wird durch ein leichtes Band aus Stoff von einem Elektromotor angetrieben. Herrscht irgend ein Kräftepaar in diesem statisch ausbalancierten Körper, so zeigt sich dasselbe darin, dass das eine oder das andere Lager oder auch beide gleichzeitig auf der Kugelschar seitliche Bewegungen ausführen. An die Lager ist vermittelst eines Hebelmechanismus ein Zeiger angeschlossen, welcher den Bewegungen der Lager in vergrössertem Masstabe folgt. Aus diesen Bewegungen schliesst man dann auf die Grösse der Exzentrizität.

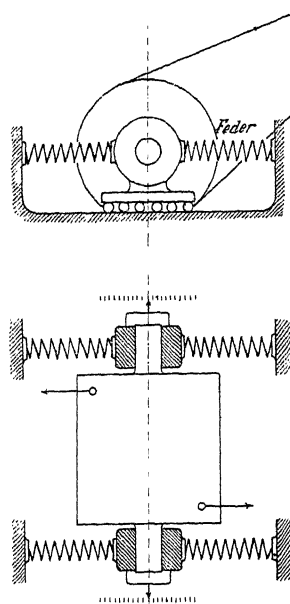



Fig. 164 a.

Eine bequeme Methode zum raschen Ausbalancieren von Turbodynamos hat *Ferranti* im E. P. 4556 B (Jahr 1904) angegeben. Am Rande des Rotors wird seitlich eine schwalbenschwanzförmige Rinne eingedreht, in die man eine Reihe Balanciergewichte einschiebt. Diese Gewichte werden einfach so lange am Umfange verschoben und dann durch Schrauben angepresst, bis dynamisches Gleichgewicht vorhanden ist.

Um Vibrationen zu vermeiden verwende man für die Fundamente von Turbogeneratoren ziemlich unelastisches Material z. B. Cement, Backstein, aber keine Eisenkonstruktionen.

Zur Erzielung ruhig laufender Rotoren beachte man folgendes: Verwendung homogener Materialen; absolut symmetrischer Entwurf; alle Teile innen und aussen bearbeitet; steife Welle, die nicht vibriert; dauernd festgelegte Wicklungen und Isolation; die normale Geschwindigkeit soll unter der kritischen liegen, jedenfalls sollte sie möglichst weit von der kritischen abliegen. Im Interesse des ersten Punktes liegt die Vermeidung von Gussmaterial und die möglichste Verwendung von Schmiedestücken. Für den ruhigen Gang der Welle sollte das Verhältnis Abstand der Lagermitten l zu maximalem Wellendurchmesser d möglichst klein sein (siehe Formel 47, worin $d^4 : l^3$ enthalten ist). Bei kleinen Generatoren ist $l : d =$ 6 bis 8 und bei grossen 2,5 bis 3. Ist das Verhältnis gross, so hat man beim Balancieren nicht allein in der Mitte, sondern auch an den Enden Ausgleichsgewichte anzubringen. Der unsicherste Faktor beim Ausbalancieren ist die Isolation der Wicklungen; diese wird mit der Zeit trocken und durch die Fliehkräfte so zusammengepresst, dass die Wicklung sich verschieben und aus dem Gleichgewicht kommen kann, was besonders dann noch leicht eintritt, wenn der Rotor einmal zufällig auf höhere Geschwindigkeit oder auf die kritische kommt. Beim Ausbalancieren ist zu beachten, dass bei 90 m/Sek. Umfangsgeschwindigkeit die Fliehkraft meist ca. 3000 mal grösser als das

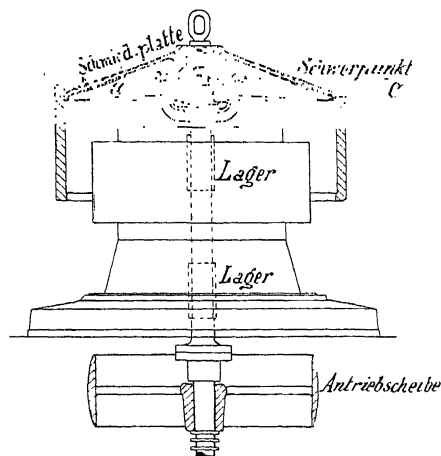



Fig. 165.

Gewicht ist, weshalb schon kleine Ausgleichsgewichte genügen. Die Methode, nach der die Glocken der grossen Aussenpolmaschinen der Westinghouse Co. (Fig. 16) ausbalanciert wurden, zeigt Fig. 165; die Glocke wird auf eine Stahlkugel von 10 mm ϕ gesetzt, so dass ihr Schwerpunkt mit der vertikalen Ebene durch die Kugel zusammenfällt. Durch eine Riemenscheibe wird sie dann angetrieben; ihre Ausweichungen werden durch innen aufgelegte Platten a kompensiert.

GERÄUSCHLOSER GANG.

Es ist bekannt, dass alle raschlaufenden Maschinen eine gewisse Tendenz zu einem weithin hörbaren, dröhnenden oder pfeifenden Lärm haben, hervorgerufen durch die raschen Luftbewegungen. Die hauptsächliche Ursache für diesen Lärm sind vorstehende Wicklungs- und andere Maschinenteile, welche Luftwirbel und Querschnittsveränderungen der strömenden Luft erzeugen, ausserdem können aber auch lose Maschinenteile, z. B. lose Wicklungsstäbe oder nicht genügend festgepresste Zähne oder sich lockernde Isolationsteile diese Wirkung erheblich verstärken. Die beste Abhilfe besteht darin, den rotierenden Teil als allseitig ganz glatt abgeschlossene Trommel auszuführen, was bei der Anordnung Fig. 59 ohne weiteres geht. Bei ausgeprägten Polen muss man diese eventuell durch zylindrische und ebene Bleche oder Bandagen abschliessen (Fig. 151), in denen aber geeignete Ventilationskanäle vorzu-

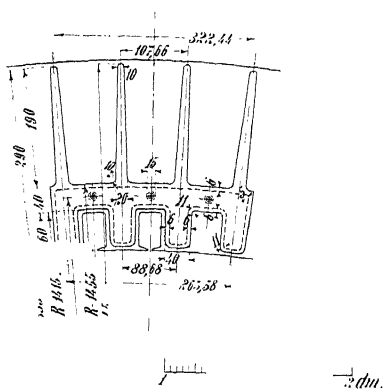



Fig. 166. Union E. G.

sehen sind (siehe z. B. Fig. 28). Ausserdem ist anzuraten, die Wicklungen nicht allein im rotierenden, sondern auch im feststehenden Teile solid mit Keilen festzulegen und die Zähne durch kräftige Druckfinger zu stützen. (Fig. 166 Konstruktion der Union-E.-G.) Die Lüftekanäle im Stator und Rotor sind axial gegen einander zu versetzen, überhaupt ist dafür Sorge zu tragen, dass sich die Kühlluftströmungen nicht an scharfen Kanten stossen. Selbstverständlich für einen erschütterungsfreien Lauf ist das gründliche Ausbalancieren des Rotors.

Platzbedarf, Gewicht und Preis von Turbodynamos sind soweit als möglich unter „Praktische Daten" in meiner Brochure „Dampfturbinen" angegeben. Ein Vergleich des Platzbedarfs hat sich auf folgende Betriebsarten zu erstrecken:

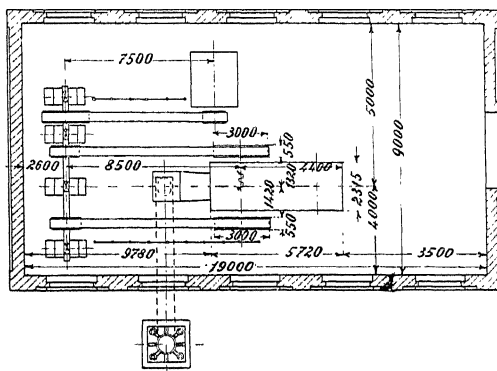



Fig. 167. Heissdampflokomobile von R. Wolf, Magdeburg.

1. liegende Dampfmaschinen je mit besonderem Kesselhaus, dabei ist noch zu unterscheiden zwischen Riemenantrieb und direkter Kupplung mit der Dynamo zwischen oder neben den Zylindern:
2. stehende Dampfmaschinen je mit besonderem Kesselhaus, usw. wie eben;

3. Lokomobile mit Kessel und Dampfmaschine in einem Stück und Riemenantrieb der Dynamo, z. B. die Heissdampflokomobile nach Fig. 167 von R. Wolf in Magdeburg-Buckau;

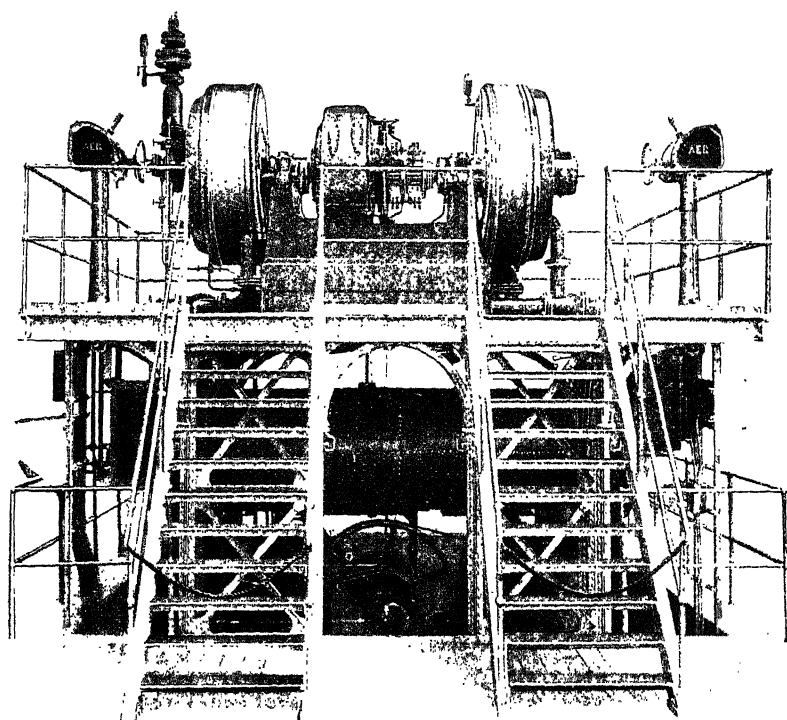



Fig. 168. Dampfturbinenlokomobile der A. E. G. Berlin.

4. Dampfturbinen mit direktgekuppelter Dynamo und besonderem Kesselhaus;
5. Dampfturbinenlokomobile, wobei die Dynamo und Turbine auf dem Kessel sitzen, ähnlich Fig. 168 der A.-E.-G. Berlin für 150 PS_e und 3000 Touren;
6. Gasmotoren (liegend oder stehend) mit riemengetriebener oder direktgekuppelter (zwischen oder neben den Zy-

lindern) Dynamo; dazu ist die Gaserzeugungsanlage und das Gasreservoir zu rechnen;

7. Petroleum- oder Benzinmotoren d. h. allgemein Motoren mit flüssigem Brennstoff, samt Vergaser, meist stehend;

Den geringsten Platzbedarf hat Nr. 5, dann folgt wohl Nr. 3, dann Nr. 7, dann Nr. 4, weiter Nr. 2, zwischen Nr. 1 und 6 dürfte kein nennenswerter Unterschied vorliegen.

Zu der vergleichenden Dampfverbrauchtabelle S. 107 in „Dampfturbinen" sind noch die Ergebnisse der Heissdampf-lokomobile von R. Wolf Magdeburg zu fügen:

PS_e	kg Dampf pro PS_e
50	5,05
150	4,76
300	4,70

Bei entsprechend kleinen Dampfturbinen ist dieses günstige Resultat bis jetzt nicht erreicht.

Für die nach Paris gelieferten 5000 KW-Turbodynamos (750 Touren) von Brown, Boveri & Cie., gilt folgendes*):

	Gewicht
Turbine	90 t
Kondensator und Rohrleitungen .	50 t
Dynamo	60 t
	200 t

d. h. 27 kg Turbinengewicht pro KW gegen 178 kg bei stehenden Dampfmaschinen, oder samt Dynamo 220 kg pro KW bei Corlissmaschinen und 40 kg bei Dampfturbinen.

Die Länge dieser Turbine ist 9820 mm, die der Dynamo 4400, total 14 220 mm; Breite mal Höhe = 2500 · 2500 für die Turbine und 3500 · 3400 mm für die Dynamo.

Die mit 1000 Uml./Min. arbeitende, 10 000-pferdige Parsonsturbine von Brown, Boveri & Cie. für Essen a/Ruhr ist mit einem Drehstromgenerator von 6250 KVA bei 5000 Volt und

*) Troske Z. V. D. I. 1905, S. 575.

50 Per./Sek. sowie mit einem Gleichstromgenerator von 1550 KW bei 600 Volt gekuppelt und an eine Zentralkondensation angeschlossen. Der Gesamtmaschinensatz ist 19,7 m lang und wiegt 190 t, wovon 9,4 m bzw. 107 t auf die Turbine entfallen. Die grösste Höhe der Turbine über Fussboden beträgt 2,6 m, die grösste Breite ebenfalls 2,6 bis 3,2 m. Die Turbine ist *ein*zylindrig. Der Drehstromgenerator ist 5,8 m lang, der Gleichstromgenerator 4,4 m; der höchste Punkt des ersten Generators liegt 4 m über dem Boden.

Preise der Lavalturbinen in Mark:

PS	KW	Turbine	Kondensator	Grundplatte für Dynamo	Dynamo
3	1,7	650	—	—	1 500
20	12,6	2 600	600	70	4 250
300	200	22 800	4 000	150	45 300

Preise der Parsonsturbinen samt Dynamo von Brown, Boveri & Cie.:

KW	Gewicht kg	Preis M.
90	6 000	27 000
600	21 000	55 000
1 800	56 000	130 000
12 000	244 000	500 000

PRÜFUNG VON TURBODYNAMOS.*)

Bei der Abnahme von Turbodynamos hat man ausser den üblichen Proben namentlich die rotierenden Wicklungen mit einem Mehrfachen der Normalspannung zu prüfen; z. B. eine 110voltige Erregerwicklung mit 1000 bis 2000 Volt Wechselstrom. Der Rotor muss bei allen Geschwindigkeiten von 0 bis etwa 30% über die normale völlig ruhig laufen, es darf kein Verschieben, kein Arbeiten der einzelnen Teile stattfinden.

Als Isolationsprüfung empfiehlt die Maschinenfabrik Oerlikon die Verwendung von mindestens der 1,5fachen *selbsterzeugten* Betriebsspannung während 10 Minuten. Bei dieser Prüfung mit *Wechsel*strom wird abwechselnd eine Klemme mit dem Gestell und der Niederspannungswicklung verbunden. Bei Gleichstrom ist die 4fache Betriebsspannung mindestens 1500 Volt anzuwenden, bei Wechselstrom bis 10000 Volt die doppelte Betriebsspannung mindestens aber 1500 Volt; über 10000 Volt genügt die 1,5—1,6fache Betriebsspannung.

---

*) Über die Prüfung der elektrischen Maschinen im allgemeinen siehe Niethammer, Elektrotechn. Praktikum.

Eine einwandsfreie Bestimmung des *Wirkungsgrades* der Turbodynamos ist nicht allein für den Elektriker, sondern noch viel mehr für den Turbinenkonstrukteur von Wichtigkeit, da dieser seine Dampfverbrauchziffern pro PS_e/Stunde auf den Wirkungsgrad des elektrischen Teils basieren muss. Daran hat man jedoch bei Zeiten zu denken; die elektrischen Versuche lassen sich nämlich häufig nur in der elektrotechnischen Fabrik vor der Ablieferung und dem Zusammenbau mit der Turbine einwandsfrei ausführen. Sofern eine direkte Bremsung nicht möglich ist, die zudem die Dynamo als Motor untersucht, sollte man den Wirkungsgrad der Drehstrommaschinen aus einem Leerlauf- und einem Kurzschlussversuch nach der Hilfsmotormethode bestimmen, d. h. man treibt den Turbogenerator möglichst direkt und ohne Verlust im Antriebselement durch einen geeichten Gleichstrommotor an, wozu eventuell die Erregerdynamo verwendet werden kann, und zwar einmal bei offener Statorwicklung und normalem Magnetflux und einmal bei kurzgeschlossener Statorwicklung bei normalem Hauptstrom; die Lager- und Bürstenreibung ist bei ausgeschalteter Erregung für sich zu ermitteln. Damit findet man direkt die Summe: Eisenverlust + Statorkupferverluste + Lager-, Bürsten- und Luftreibung samt den nicht berechenbaren Wirbelstromverlusten im Kupfer und in den Polschuhen, die allerdings bei Vollastbetrieb durch die Feldverzerrung noch etwas gesteigert werden können. Der in der Erregerwicklung verzehrte Effekt sollte direkt aus dem Erregerstrom bei Vollast mit dem verlangten $\cos\varphi$ ermittelt werden. Der Wirkungsgrad einer direkt gekuppelten Erregermaschine sollte für sich bestimmt werden, was allerdings nur angeht, wenn sie in zwei eigenen Lagern läuft, sonst hat man sie in provisorische Lager einzubauen und deren Reibungsverlust abzuziehen. Eine Unsicherheit besteht noch bezüglich der Einstellung des normalen

Magnetfluxes bei dem Leerlaufversuch; dieser Flux muss nämlich der vektoriellen Summe: Klemmenspannung + *Ohm*-schem und induktivem Abfall je per Phase entsprechen und der induktive Abfall, ebenso der Abfall, der durch Wirbelströme bedingt wird, ist in einfacher Weise nicht messbar. Man wird diese allerdings nicht erhebliche Korrektion am besten durch eine zuverlässige Berechnung des induktiven Abfalls erledigen.

Die Maschinenfabrik Oerlikon schlägt mit Recht folgendes einfache Verfahren zur Ermittlung des *Spannungsabfalls* bei beliebigem cos φ vor. Durch induktive Belastung mit einer zweiten gleichen Maschine als untererregten Synchronmotor oder mit einem beliebigen leerlaufenden Synchronmotor ermittelt man bei normalem Strom und normaler Spannung für ungefähr cos $\varphi = 0$ den maximalen Spannungsabfall e_0. Für irgend einen andern cos φ besteht dann zwischen Klemmenspannung E_k und der E·M·KE bei der entsprechend e_0 festgelegten Erregung die Bezeichnung

$$E^2 = E_k^2 + e_0^2 + 2 \cdot e_0 E_k \sin \varphi$$

Der Spannungsabfall ist $E - E_k$.

Bei Gleichstromdynamos lassen sich die einzelnen Verluste etwas einwandsfreier ermitteln als bei Drehstrom: die Eisen- und Reibungsverluste aus einem Leerlaufversuche durch Antrieb mittels eines geeichten Hilfsmotors, die Kupferverluste im Anker und in der Hilfspolwicklung durch eine Widerstandsmessung, die Ohmschen Verluste am Kommutator durch direkte Messung des Bürstenwiderstandes bei normaler Drehzahl, was allerdings etwas umständlich ist; die Erregungsverluste misst man direkt bei einem Vollastversuche. Die totalen Kupferverluste im Anker und Kommutator lassen sich vielleicht am sichersten durch einen Kurzschlussversuch finden, d. h. man schliesst die Klemmen bei voller Tourenzahl über die Hilfspole kurz und erregt nun so stark, dass gerade der normale

Strom auftritt; die Effektverluste misst man dabei durch Antrieb mit Hilfe eines Hilfsmotors, wobei die Reibungsverluste durch einen besonderen Versuch zu eruieren sind. Der Kurzschlussversuch lässt gleichzeitig die Güte der Kommutation erkennen.

Wesentlich einfacher und in vielen Fällen genügend genau lässt sich der Wirkungsgrad von Gleich- und Drehstromgeneratoren aus einem Leerlaufversuch ermitteln, wobei die Dynamo bei sonst normalen Verhältnissen als Motor betrieben wird. Dazu seien A_v Kilowatt erforderlich, eventuelle Leerlaufs-Kupfer- und Erregungsverluste abgerechnet. Aus einfachen Widerstandsmessungen (warm = 60^0 C) findet man noch die Kupferverluste A_k im induzierten Teil und die Erregungsverluste A_e (ohne Vorschaltwiderstände), während die Ohmschen Verluste am Kommutator oder an m Schleifringen sind: $c \cdot J$ bezw. $m \cdot c \cdot J$ in Kilowatt, sofern J der Wattstrom am Kommutator oder Schleifring ist; im Mittel ist c = 0,002 für Kohlenbürsten. Damit wird der Wirkungsgrad bei $A \cdot \cos\varphi$ KW

$$\eta = \frac{A \cos \varphi}{A \operatorname{co} \varphi + A_v + A_k + A_e + m \cdot c \cdot J}$$

Die Grösse des Wirkungsgrades der Turbogeneratoren samt Lagerreibung unterscheidet sich nicht nennenswert von demjenigen langsamlaufender Generatoren gleicher Leistung ohne Lagerreibung, d. h. er ist für Drehstrom bei 100 KW zirka 91—93 %, bei 1000 KW zirka 93--95,5 % und darüber 94—97 %.

AUSZUG AUS LIEFERUNGSVORSCHRIFTEN

für eine Drehstrom-Innenpoldynamo von 300 KVA, 500 Volt, 3000 Touren, Erregerspannung kleiner als 100 Volt.

Die Dynamo ist in allen Teilen so auszuführen, dass ein Arbeiten und Verschieben der Wicklungen in Stator und Rotor, sowie im Erreger, ein Unrundwerden (Schlagen) der Schleifringe und des Erregerkommutators, sowie das Abschleudern der Bürsten der Dynamo und des Erregers dauernd mit genügender Sicherheit vermieden wird.

Die Stirnverbindungen des Stators sind in solider und luftiger Weise festzulegen, so dass eine Berührung der einzelnen Leiter weder innerhalb der Spulengruppen, noch zwischen den Gruppen, noch gegen Eisen auftreten kann und zwar sollte es auch nicht eintreten bei starken Belastungs- und Tourenschwankungen oder einem Kurzschluss bei voller Erregung.

Es sind im Entwurf Anordnungen und beim Zusammenbau entsprechende Vorkehrungen zur Luftführung zu treffen, dass das Geräusch der Dynamo innerhalb zulässiger Grenzen bleibt, d. h. eine mündliche Verständigung vor der Dynamo muss anstandslos möglich sein. Die Ausbalancierung und Montage soll so genau sein, dass der Gang innerhalb $\pm$ 10 % der normalen Tourenzahl ruhig und erschütterungsfrei bleibt.

Die Zuleitungen zu den Schleifringen sind so gründlich zu isolieren und so solid festzulegen, dass ein Durchscheuern derselben auf die Dauer ausgeschlossen ist.

Bezüglich des Erregers gilt: Kräftige, leicht und fein justierbare Bürstenhalter, deren Bürsten auch bei kleineren Unebenheiten des Kollektors nicht abgeschleudert werden dürfen;

die Bürsten dürfen aber auch den Kollektor nicht stark angreifen. Der Kollektor muss dauernd praktisch rund laufen, d. h. es dürfen sich beim Betrieb weder vorstehende Glimmer-, noch Kupfersegmente zeigen.*) Es sollten am Erreger vier Bürstensätze mit mindestens je zwei einzelnen Bürsten vorgesehen werden, ein Überschlagen auf das Lagerschild von den Bürsten aus ist wirksam zu verhindern, besser ist es noch, die Kommutatorseite ganz offen ohne Schild auszuführen. Die folgenden Proben werden angestellt. Isolationsprüfung: Rotorwicklung (Feld) mit 2000 Volt Wechselstrom $^1/_4$ Stunde lang stehend und mit 500 Volt kurze Zeit bei voller Tourenzahl. Statorwicklung mit 2000 Volt Wechselstrom $^1/_4$ Stunde lang zwischen Wicklung und Gestell, sowie zwischen den einzelnen nicht verketteten Phasen. Erregermaschine mit 1000 Volt Wechselstrom. Diese Prüfungen sind bei zusammengebauter Dynamo auszuführen. — Mechanische Prüfung der gesamten Dynamo samt Erreger bei 20 % Tourensteigerung eine Viertelstunde lang ohne Belastung. Beobachtung der Dynamo bei Tourenzahlen innerhalb + 20 % der normalen. Aufnahme der Leerlauf- und Kurzschlusscharakteristik. Bestimmung der Einzelverluste.

Mehrtägiger ununterbrochener Probe-Dauerlauf in der Fabrik, davon 22 Stunden mit Vollast, und anschliessend 2 Stunden mit 30 % Überlast. An einem zweiten Tag sollen Versuche derartig gemacht werden, dass 30 % Überlast und eventuell ein Kurzschluss bei Normalerregung aus- und eingeschaltet wird. Die übrige Zeit soll die Maschine im Leerlauf mit einer Erregung betrieben werden, welche dem Vollaststrom bei 500 Volt und $\cos \varphi = 0$ entspricht, eventuell abwechselnd mit einem Kurzschlussbetrieb mit einem Strom gleich dem 1,3fachen Vollaststrom.

*) Siehe Niethammer, „Elektrotechnische Fabriken“, S. 210 ff.

Bei Vollastbetrieb darf kein Teil der Maschine oder des Erregers mehr als 45° C über Aussentemperatur annehmen, wobei die Temperaturen der Wicklungen aus den Widerstandsänderungen ermittelt werden.

Gelegentlich des Dauerbetriebes ist die Spannungserhöhung bei einem oder möglichst bei mehreren Leistungsfaktoren zu ermitteln. Die Spannungserhöhung beim Ausschalten der Volllast und $\cos \varphi = 0{,}85$ darf 15% oder 18% bei $\cos \varphi = 0{,}8$ keinesfalls überschreiten, sofern nicht ein einwandsfrei arbeitender automatischer Spannungsregulator eingebaut wird.

Zu allen Versuchen sind die für den späteren Betrieb bestimmten Regulierwiderstände beizustellen.

Den Widerstandsreglern ist eine feine Unterteilung zu geben, so dass die Spannung stets auf 1% eingestellt werden kann, auch der zweite grobe Regler darf nicht zu grobstufig sein; er sollte pro Stufe höchstens eine Spannungsänderung von 6—8% hervorrufen. Die Regler sind mit der Aufschrift „grob", „fein", „mehr Spannung", „weniger Spannung" oder ähnlichem zu versehen. Beide Feldregler sind, sofern sie ihren Erregerkreis unterbrechen, mit Funkenlöschwiderständen auszurüsten, ein Schliessen auf den Anker allein genügt nicht, da ein Abschleudern der Bürsten den Stromschluss für den Extrastrom verhindern kann. Auf robuste Ausführung der Kontakte der Feldregler ist besonders zu achten.

Bei der Montage an Ort und Stelle ist mit aller Sorgfalt vorzugehen, so dass die Inbetriebsetzung anstandslos und rasch vor sich geht; beim Einbau ist vor allem darauf zu achten und alles Erforderliche vorzukehren, dass die Maschine auch an ihrem definitiven Aufstellungsort erschütterungsfrei und geräuschlos läuft, was ja durchaus noch nicht durch den Probebetrieb gewährleistet wird. Es ist eine Instruktion über die Behandlung der Dynamo samt Erreger mitzuliefern.

BEISPIELE AUSGEFÜHRTER DREHSTROM-TURBODYNAMOS.

a) Nach H. S. Meyer (Electrician 1906, Januar): 1770 KVA, 11000 Volt Drehstrom, 50 Per., $\cos\varphi = 0{,}85$, 1000 Touren, 6 rotierende, ausgeprägte Pole (Fig. 37), Rotordurchmesser $d = 1220$ mm, totale axiale Eisenlänge $l = 585$ mm (7 Luftkanäle zu 12,5 mm), $C = KVA : d^2 lu = 2{,}04$ in m; $v = 64$ m/Sek. 3 offene Nuten 27×70 mm pro Pol und Phase (3 Phasen), AW_a pro Pol = 5200, AS = 185; Stromdichte Stator 2,7 Amp./qmm, Feld 2,4 Amp./qmm. Flux pro Pol = $18 \cdot 10^6$; Induktion im Stator 7800, Zähne 16400, Luft 8100, Pol 15800, Joch 12400. Totale Feld-AW pro Pol = 16 800 für $\cos\varphi = 0{,}85$ (18% Spannungserhöhung). Luftspalt = 11—22 mm. Verluste in KW:

	$\cos\varphi = 1$	$\cos\varphi = 0{,}85$
Ankerkupfer	6,5	9,0
Erregung	5,3	8,5
Eisen	31,1	31,1
Lager- und Luftreibung .	20,0	20,0
η	95,9	95,6

Vergleich der Gewichte dieser Turbodynamo in Tonnen mit einem Generator gleicher Leistung für u = 94 Touren:

u	1000	94	
Stator	11,3	18	t
Rotor	5	13,6	t
Schwungrad	—	41	
Total	16,3	72,6	t
Aktives Eisen (Stator und Pole)	7,2	7,2	t
Kupfer	1,1	3,8	t

b) Vom Verfasser: 350 KW, cos $\varphi = 1$, 2000 Volt Dreiphasenstrom, 1500 Touren, 50 Per., 4 Pole in Walzenform (wie Fig. 61), d = 750, l = 440 mm (5 Kanäle à 14 mm), C = KVA : d^2lu = 0,95 in m; v = 56 m/Sek. 4 Nuten 19×30 mm pro Pol und Phase, AW_a = 3350 pro Pol, AS = 122. Stromdichte Stator = 3,1 Amp./qmm, Feld = 3,1 Amp./qmm. Flux pro Pol = $12{,}2 \cdot 10^6$; Induktion Stator 6300, Zähne 12800, Luft 8100, Luftspalt 15 mm.

c) Dreiphasengenerator (Innenpoltype) von Dick, Kerr & Co.*) für 3000 KW, u = 750, 25 Per., 6700 Volt, 4 ausgeprägte Pole. d = 1270, l = 1150 mm, C = KW : d^2lu = 2,15 in m. Die Verluste sind die folgenden:

	3000 KW	1000 KW
Totaler Erregungsverlust . . .	9,5 KW	6 KW
Stator-Kupferverlust	11 KW	4 KW
Eisenverluste	62 KW	19 KW
Lager- und Luftreibung (2 Lager)	27 KW	16 KW

Die zweite Spalte gilt für eine 1000 KW-Dynamo derselben Firma.

d) 50 KW dreiphasig 3000 Touren, 190 Volt, 50 Per., 2 Innenpole (Walzenform, ähnlich Fig. 61) der Gesellschaft für elektrische Industrie Karlsruhe**). d = 360, l = 240 mm, C = KW : d^2lu = 0,54 in m; v = 57 m/Sek. Spannungserhöhung bei cos $\varphi = 1$ ca. 15%, bei cos $\varphi = 0$ ca. 40%. Eisenverluste 2,5 KW, totaler Wirkungsgrad samt Erreger = 87%.

Für solch' kleine zweipolige Drehstromgeneratoren ist es wesentlich vorteilhafter, bei Spannungen bis 1000 Volt und Leistungen bis gegen 500 KW die Aussenpoltype mit ruhendem Feld zu verwenden, da die Spannungsregulierung be-

*) Electrician, November 1905.

**) Handbuch der Elektrotechnik, Bd. IV, 2. Auflage, unter obiger Firma.

deutend günstiger und die Eisenverluste kleiner werden. Wegen der Schwierigkeit, kleinen Spannungsabfall zu erzielen, verwendet die Westinghouse Co. Unipolarmaschinen für ca. 5 Volt zur Erregung. Siehe hierüber und über die verschiedenen Ventilationsmethoden von Turbodynamos meinen Aufsatz in E. T. Z. 1906.

Zahlreiche Turbodynamos beschreibt S. P. Thompson in Dynamo-electric machinery Vol. II, 7. Aufl., S. 439.

ZUSATZ.

Seite 69: Die dort erwähnte 2000 KW-Dynamo der G. E. Co. macht 750 Touren und hat bei 575 Volt 10 Pole. Dem Fusslager der Turbodynamo mit stehender Welle führen zwei Wasserpumpen, die in der Minute ca. 35 Liter bei 55 Atmosphären leisten, Kühlwasser zu. Die übrigen Lager erhalten Pressöl von 2 Ölpumpen von 2,5 Atmosphären und je 3,6 Liter per Minute.

INHALTSVERZEICHNIS.

ERRATA.

Seite 51, Formel 4: v^2 statt v.

Seite 67, letzter Absatz: 10 000 PS statt 1000 PS.

Seite 118 u. In den Formeln für A_1 ist der Faktor 10^{-6} zuzufügen d. h. $\beta = 1{,}1.10^{-6}$ bis 25.10^{-6} und $c = 2.10^{-6}$ bis 5.10^{-6}.

Seite 121, Formel 47: c = 310 bezw. 700 statt 39 bezw. 87.

Seite 144, oben: „Elektrotechnik und Maschinenbau“ Wien 1906, statt E. T. Z. 1906.

Fritz Amberger vorm. David Bürkli

Verlag ◎ Zürich.

Haushaltungsbuch der sparsamen Hausfrau.

Preis Fr. 1.50.

Hiezu **Notizbloc** für die täglichen Abrechnungen, *Fr. 1.50.*

Bibliothekzeichen.

Zweiunddreissig **Exlibris,** gezeichnet von *Lor. M. Rheude.* Mit einem Vorwort von *L. Gerster,* Pfarrer. — *Preis Fr. 5.—.*

Ahnentafeln,

sechs Stück Fr. 1.—.

Genealogietabellen,

50 Stück Fr. 3.50.

David Bürkli's Züricher Kalender.

Ältester und beliebtester Kalender der Schweiz,

mit astronomischen Beobachtungen jeden Monats; Sonnen- und Mondlauf; Marktverzeichnis für die Schweiz und Baden; schöne Erzählungen, Anekdoten etc. — Reich illustriert. — Preis 50 Cts. (50 Pfg.)